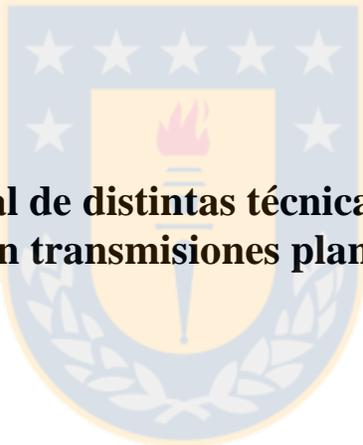




Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería
Mecánica



Evaluación experimental de distintas técnicas para el diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica

IGNACIO ESTEBAN MORALES MORA
CONCEPCIÓN-CHILE
2018

Profesor Guía: Cristián Molina Vicuña
Dpto. de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

RESUMEN

Existen diferentes técnicas para el diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias, tales como el análisis de la aceleración transversal, el análisis de la velocidad angular instantánea, el análisis de emisiones acústicas, entre otras. A su vez, existen diferentes técnicas de procesamiento de señales utilizadas para extraer indicadores de la condición mecánica en este tipo de transmisiones, tales como el análisis espectral, el promedio sincrónico, el análisis de la señal residual y señal diferencia, la demodulación de amplitud y frecuencia, entre otras. Las técnicas mencionadas presentan buenos resultados en el diagnóstico de fallas; sin embargo, la mayoría de la literatura referida se enfoca principalmente en la aplicación de la técnica propuesta y no en la caracterización de síntomas vibratorios o en la comparación con los resultados entregados por otras técnicas.

El objetivo general de este trabajo es evaluar experimentalmente distintas técnicas para el diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias y determinar su capacidad de diagnóstico ante diferentes tipos de daño local bajo condiciones de operación variable. Las técnicas consideradas son: el análisis de la vibración registrada por un acelerómetro fijo al anillo; y, el análisis de la velocidad y aceleración angular instantánea del engranaje sol determinada a partir de un encoder óptico acoplado al eje del sol y de un encoder óptico acoplado al motor en su extremo libre. Los objetivos específicos de este trabajo son determinar en qué condiciones y con qué técnica es posible diagnosticar de mejor forma cada tipo de daño.

La metodología utilizada para lograr los objetivos propuestos en este trabajo es: en el banco de ensayos del Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de la Universidad de Concepción, realizar diferentes mediciones de aceleración transversal y velocidad angular; aplicar diferentes técnicas de procesamiento de señales a las mediciones realizadas; y, comparar los resultados entregados por las distintas técnicas para el diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias.

Se concluye que un daño local, ya sea en el sol, en un planeta o en el anillo produce variaciones en la aceleración transversal, en la velocidad y aceleración angular instantánea del sol. Se observa que el uso de la aceleración angular instantánea en vez de la velocidad angular instantánea realza la evidencia del daño al aumentar la amplitud de las componentes en alta frecuencia, que es donde se encuentran las zonas resonantes de la transmisión. Para los casos de daño local en un planeta y daño local en el sol, se confirma que la velocidad y aceleración angular instantánea del sol presentan una menor cantidad de familias de bandas laterales que la aceleración transversal. Para las condiciones de operación de velocidad de rotación y carga variable, se destaca la capacidad de detección de daño de la aceleración angular instantánea del sol por sobre la aceleración transversal. Se destaca además la efectividad del análisis de la señal diferencia como técnica de procesamiento de señales para el diagnóstico de daños de tipo local.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	i
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	iv
ÍNDICE DE TABLAS	v
NOMENCLATURA	vi
CAPÍTULO 1	1
Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general.....	2
1.1.2. Objetivos específicos	3
1.2. Metodología.....	3
CAPÍTULO 2	4
Cinemática y dinámica de la transmisión planetaria.....	4
2.1. Frecuencia de rotación de los componentes de la transmisión planetaria.....	4
2.2. Vibración en transmisiones planetarias	6
2.2.1. Aceleración transversal	6
2.2.2. Velocidad y aceleración angular instantánea del sol.....	7
CAPÍTULO 3	10
Descripción del desarrollo experimental.....	10
3.1. Descripción general del banco de ensayos	10
3.2. Descripción general del sistema de adquisición de datos.....	11
3.3. Condiciones mecánicas ensayadas	11
3.4. Condiciones de operación ensayadas	11
CAPÍTULO 4	15
Adquisición y procesamiento de datos.....	15
4.1. Acondicionamiento de señales	15
4.1.1. Aceleración transversal.....	15
4.1.2. Velocidad y aceleración angular instantánea del sol	18
4.2. Procesamiento de señales	21

CAPÍTULO 5.....	27
Discusión preliminar de las técnicas a evaluar	27
5.1. Selección del encoder a utilizar.....	27
5.2. Aceleración angular instantánea.....	30
5.3. Multiplicidad de planetas	30
CAPÍTULO 6.....	34
Análisis de resultados: ensayos bajo condiciones de operación constante	34
6.1. Transmisión sin daño.....	34
6.2. Daño en el sol	35
6.3. Daño en un planeta	36
6.4. Daño en el anillo.....	39
CAPÍTULO 7.....	41
Análisis de resultados: ensayos bajo condiciones de operación variable	41
7.1. Transmisión sin daño.....	41
7.2. Daño en el sol	43
7.3. Daño en un planeta	45
7.4. Daño en el anillo.....	47
CAPÍTULO 8.....	49
Conclusiones y perspectivas	49
8.1. Conclusiones generales	49
8.2. Perspectivas	50
REFERENCIAS.....	51

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 2.1. Esquema de una transmisión planetaria.....	5
Figura 2.2. Cinemática de la transmisión planetaria (Adaptación de McFadden, 1991).	5
Figura 2.3. Comparación de la aceleración transversal en una transmisión de engranajes de ejes fijos y en una transmisión planetaria.....	8
Figura 2.4. Comparación de la velocidad angular instantánea del sol en una transmisión de engranajes de ejes fijos y en una transmisión planetaria	9
Figura 3.1. Banco de ensayos del LVM UdeC.	10
Figura 3.2. Daño local en el sol.	12
Figura 3.3. Daño local en un planeta.	12
Figura 3.4. Daño local en el anillo.	12
Figura 3.5. Patrones de carga variable utilizados.....	13
Figura 3.6. Construcción de un patrón de carga variable.....	14
Figura 4.1. Comparación del espectro de la vibración, espectro en Hz y espectro en orders	18
Figura 4.2. Aceleración transversal, ensayo de partida.....	19
Figura 4.3. Espectro de la aceleración angular instantánea del sol.....	20
Figura 4.4. Aceleración angular instantánea del sol, ensayo de partida	22
Figura 4.5. Ensayo de partida, motor desacoplado	23
Figura 4.6. Construcción de la señal diferencia, aceleración transversal	25
Figura 4.7. Construcción de la señal diferencia, velocidad angular instantánea	26
Figura 5.1. Espectro y señal diferencia de la velocidad angular instantánea, encoder lado planetario y lado motor	28
Figura 5.2. Espectro y señal diferencia de la velocidad y de la aceleración angular instantánea del sol	31
Figura 5.3. Espectro y señal diferencia de la velocidad de la aceleración transversal.....	32
Figura 6.1. Espectro, transmisión sin daño	34
Figura 6.2. Espectro, daño en el sol	37
Figura 6.3. Señal diferencia, daño en el sol	37
Figura 6.4. Espectro, daño en un planeta	38
Figura 6.5. Señal diferencia, daño en un planeta	38
Figura 6.6. Espectro, daño en el anillo.....	40
Figura 6.7. Señal diferencia, daño en el anillo.....	40
Figura 7.1. Relación entre el torque resistente y la velocidad de rotación	41
Figura 7.2. Representación en tiempo-frecuencia.....	42
Figura 7.3. Espectro en <i>orders</i> , transmisión sin daño	43
Figura 7.4. Espectro en <i>orders</i> , daño en el sol	44
Figura 7.5. Señal diferencia, daño en el sol	44
Figura 7.6. Espectro en <i>orders</i> , daño en un planeta.....	46
Figura 7.7. Señal diferencia, daño en un planeta	46
Figura 7.8. Espectro en <i>orders</i> , daño en el anillo	47
Figura 7.9. Señal diferencia, daño en el anillo.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Resumen del contenido espectral de la aceleración transversal en una transmisión planetaria	8
Tabla 2.2. Resumen del contenido espectral de la velocidad angular instantánea del sol en una transmisión planetaria.....	9
Tabla 3.1. Características de la transmisión planetaria del banco de ensayos.	11
Tabla 3.2. Condiciones mecánicas ensayadas.....	11
Tabla 3.3. Condiciones de operación constantes ensayadas.	12
Tabla 4.1. Frecuencia de muestreo cíclica para la aceleración transversal.....	18
Tabla 4.2. Frecuencia de muestreo cíclica para la velocidad angular instantánea.	21
Tabla 5.1. <i>FM4</i> de la velocidad angular instantánea, encoder lado planetario y lado motor.....	28
Tabla 5.2. <i>FM4</i> de la velocidad y aceleración angular instantánea del sol.....	31
Tabla 5.3. <i>FM4</i> de la aceleración transversal y aceleración angular instantánea, daño en el anillo.....	33
Tabla 5.4. <i>FM4</i> de la aceleración transversal y aceleración angular instantánea, daño en el sol.	33
Tabla 6.1. <i>FM4</i> , daño en el sol.....	36
Tabla 6.2. <i>FM4</i> , daño en un planeta.....	36
Tabla 6.3. <i>FM4</i> , daño en el anillo.	39
Tabla 7.1. <i>FM4</i> , daño en el sol.....	45
Tabla 7.2. <i>FM4</i> , daño en un planeta.....	45
Tabla 7.3. <i>FM4</i> , daño en el anillo.	48



Todas las Figuras y Tablas son de elaboración propia del autor, excepto Figura 2.2 (Adaptación de McFadden, 1991)

NOMENCLATURA

$acc(t)$	Vibración registrada por un acelerómetro fijo al anillo
$diff_{int}\{x(t)\}$	Señal diferencia de frecuencia f_{int} de la señal $x(t)$
f_c	Frecuencia de rotación del carrier
f_g	Frecuencia de engrane
f_{int}	Frecuencia de falla del engranaje de interés
$fix(x)$	Parte entera de x
f_{max}	Frecuencia máxima en el espectro
f_p	Frecuencia de rotación de los planetas
f_s	Frecuencia de rotación del sol
F_S	Frecuencia de muestreo [Hz]
$f_{s,s}$	Frecuencia de muestreo cíclica con respecto a la frecuencia de rotación del sol [muestras/rev _s]
f_{stop}	Frecuencia de corte (filtro pasa bajos) [orders]
F_{stop}	Frecuencia de corte (filtro pasa altos/pasa bajos) [Hz]
$iaa_s(t)$	Aceleración angular instantánea del sol determinada a partir del tiempo entre pulsos del encoder óptico
$ias_s(t)$	Velocidad angular instantánea del sol determinada a partir del tiempo entre pulsos del encoder óptico
l, m, n	Índice para armónico o banda lateral ($l, m, n \in \mathbb{N}$)
N	Número de planetas
N_{enc}	Resolución del encoder óptico
$N_{rev,c}$	Número de revoluciones del carrier registradas
$N_{rev,s}$	Número de revoluciones del sol registradas
$res_{int}\{x(t)\}$	Señal residual de frecuencia f_{int} de la señal $x(t)$
r_t	Razón de transmisión ($r_t = f_s/f_c = (Z_r + Z_s)/Z_s$)
T_c	Periodo de rotación del carrier ($T_c = 1/f_c$)
T_g	Periodo de engrane ($T_g = 1/f_g$)
T_{int}	Periodo de rotación del engranaje de interés relativo al carrier ($T_{int} = 1/f_{int}$)
$T_l(t)$	Torque resistente (torque aplicado al carrier)
T_R	Tiempo de registro
T_s	Periodo de rotación del sol ($T_c = 1/f_s$)
$tsa_{int}\{x(t)\}$	Promedio sincrónico de frecuencia f_{int} de la señal $x(t)$
Z_{int}	Número de dientes del engranaje de interés
Z_p	Número de dientes de los planetas
Z_r	Número de dientes del anillo
Z_s	Número de dientes del sol

CAPÍTULO 1

Introducción

Las transmisiones planetarias son usadas para transmitir potencia en un amplio rango de aplicaciones industriales debido a su buena relación entre la carga que soportan y su tamaño en comparación a las transmisiones de engranajes de ejes fijos.

El diagnóstico de fallas mediante análisis de vibraciones en transmisiones planetarias es más complejo que en transmisiones de engranajes de ejes fijos ya que la vibración registrada por un acelerómetro fijo al anillo es la suma de las vibraciones producidas en los múltiples puntos de engrane transmitidas a través de diferentes rutas variables en el tiempo. Esto produce que las técnicas típicamente usadas en transmisiones de engranajes de ejes fijos requieran una interpretación distinta o simplemente no sean aplicables directamente.

Parra (2015 y 2017) resume la caracterización de síntomas vibratorios para las condiciones de daño local en los diferentes componentes de la transmisión planetarias. Sheng (2012) presenta el estudio de una turbina eólica en condición de daño en los rodamientos y en los engranajes producto de una pérdida de lubricante. En dicho trabajo se utilizan diferentes técnicas de procesamiento de señales sobre la aceleración transversal, tales como el promedio sincrónico en el tiempo (*time synchronous average*, TSA) (Braun, 2011), algoritmos de separación de la contribución vibratoria de los planetas y el sol (McFadden, 1991) (Forrester, 1998) (Samuel y Pines, 2000) (Blunt, 2004), análisis de envolvente, análisis de la señal residual (Lebold, McClintic, Campbell, Byington y Maynard, 2000), entre otras.

El análisis de la velocidad angular instantánea (*instantaneous angular speed*, IAS) es otra técnica utilizada para el diagnóstico de fallas en equipos rotatorios. En general, para el diagnóstico de fallas en transmisiones de engranajes, se utiliza el análisis espectral (Stander y Heyns, 2005) y la demodulación de amplitud (Roy, Mohanty y Kumar, 2015) de la IAS, permitiendo encontrar componentes a la frecuencia de falla en el espectro. Morales (2016) resume el contenido espectral de la aceleración transversal y de la IAS a través del análisis de la respuesta entregada por modelos de la vibración en transmisiones planetarias, y se destaca la ventaja en la capacidad de diagnóstico a través del análisis de la IAS debido a que presenta una menor cantidad de familias de bandas laterales que la aceleración transversal. Feng y Zuo (2013) logran diagnosticar un daño severo (diente fracturado y diente roto) en un planeta y en el sol a través del análisis espectral y la demodulación de frecuencia de la señal de un sensor de torque, como alternativa a la medición de la IAS. Feng, Lin y Zuo (2016) también logran diagnosticar un daño local en el sol, en el anillo y en un planeta a través de la demodulación de amplitud y frecuencia de la IAS determinada a partir de una descomposición en tiempo-escala de la aceleración transversal.

La estimación de la IAS cobra importancia en condiciones de operación variable (*variable operation conditions*, VOC), sobre todo cuando no se dispone de un dispositivo de medición apropiado, como un

fototacómetro o un encoder óptico. Es por esto que diversos autores han propuesto métodos para la estimación de la IAS a partir de la aceleración transversal en transmisiones planetarias, con el objetivo de calcular el espectro de la vibración en *orders*. En (Combet y Zimroz, 2006 y 2009) se estima la IAS a través del seguimiento de los armónicos de la velocidad de rotación en una representación en tiempo-frecuencia de la aceleración transversal en una rotopala, con el objetivo de encontrar variaciones en la velocidad angular producto de variaciones en la carga. Zimroz, Urbanek, Barszcz, Bartelmus, Millioz y Martin (2001) calculan la IAS en una turbina eólica según el método propuesto por Combet y Zimroz (2009) y validan sus resultados utilizando la IAS determinada a partir de un fototacómetro. En (Jiang y Li 2016) y (Jiang, Li y Wang, 2016) se propone un método similar al propuesto por Combet y Zimroz (2009) y se logra detectar un daño en el rodamiento de un planeta a través del seguimiento de orden de la aceleración transversal. Feng y otros (Feng, Chen y Liang, 2016), a través de un enfoque de demodulación iterativa de componentes de una representación en tiempo-frecuencia de la aceleración transversal, logran diagnosticar un daño local y daño distribuido en el sol.

Como alternativa al uso de la velocidad angular instantánea como herramienta de diagnóstico de fallas se tiene el uso de la aceleración angular instantánea (*instantaneous angular acceleration*, IAA). La principal motivación para utilizar la IAA es que permite identificar componentes en alta frecuencia a través del análisis espectral con mayor facilidad que la IAS. A pesar de que existen diversos métodos para estimar la IAA (Ovaska y Valviita, 1998), en la literatura es difícil encontrar estudios experimentales sobre la comparación entre ambas señales. El caso más particular es el propuesto por Yu y Zhang (2010). En dicho artículo, se presenta el análisis en conjunto de la IAS y de la IAA determinada a partir de un encoder magnético en un motor a combustión del modelo de un avión, donde se logra identificar armónicos y subarmónicos de la frecuencia de rotación.

Las técnicas mencionadas anteriormente presentan buenos resultados en el diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias y en equipos rotatorios en general; sin embargo, la mayoría de la literatura referida se enfoca principalmente en la aplicación de la técnica propuesta y no en la caracterización de síntomas vibratorios o en la comparación con los resultados entregados por otras técnicas. De acuerdo a esto, es necesario evaluar en forma paralela las diferentes técnicas para el diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo es evaluar experimentalmente distintas técnicas de diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias y determinar su capacidad de diagnóstico ante diferentes tipos de daño local bajo condiciones de operación de velocidad de rotación y carga variable. Las técnicas consideradas son:

- (i) el análisis de la vibración transversal registrada por un acelerómetro fijo al anillo;
- (ii) el análisis de la velocidad y aceleración angular instantánea del sol determinada a partir de un encoder óptico acoplado al eje del sol; y,
- (iii) el análisis de la velocidad y aceleración angular instantánea del sol determinada a partir de un encoder óptico acoplado al extremo libre del eje del motor.

1.1.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos propuestos en este trabajo son:

- (i) para cada técnica a evaluar, determinar en qué condiciones es posible diagnosticar de mejor forma cada tipo de daño; y,
- (ii) determinar con qué técnica es posible diagnosticar de mejor forma cada tipo de daño.

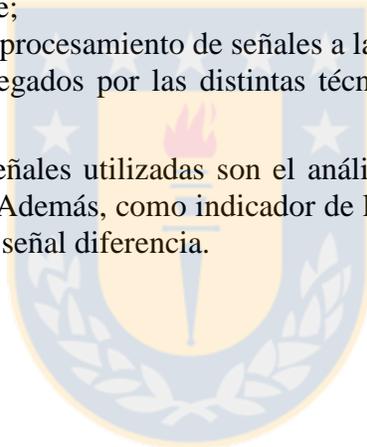
Los tipos de daño a estudiar son daño local en el sol, daño local en el planeta y daño local en el anillo.

1.2. Metodología

La metodología utilizada para lograr los objetivos propuestos en este trabajo es:

- (i) En el banco de ensayos del Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de la Universidad de Concepción, realizar diferentes mediciones de aceleración transversal, posición angular y velocidad angular instantánea, tanto para condiciones de operación de velocidad de rotación y carga constante como variable;
- (ii) aplicar diferentes técnicas de procesamiento de señales a las mediciones realizadas; y,
- (iii) comparar los resultados entregados por las distintas técnicas para el diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias.

Las técnicas de procesamiento de señales utilizadas son el análisis espectral y el análisis de la señal diferencia de las señales adquiridas. Además, como indicador de la condición mecánica se utiliza $FM4$, que se calcula como el *kurtosis* de la señal diferencia.



CAPÍTULO 2

Cinemática y dinámica de la transmisión planetaria

En este capítulo se presentan las frecuencias de rotación de los distintos componentes y el contenido espectral de la aceleración transversal y de la velocidad angular instantánea del sol en una transmisión planetaria, los que serán utilizados en los Capítulos 4 a 7 del presente informe.

2.1. Frecuencia de rotación de los componentes de la transmisión planetaria

Una transmisión planetaria tiene tres elementos que son referidos como componentes centrales (Cooley y Parker, 2014): el carrier o porta planetas, el anillo y el sol. Los planetas engranan con el sol y el anillo simultáneamente y se conectan al carrier mediante rodamientos. Todos los componentes centrales rotan en torno al mismo eje. Adicionalmente, los planetas rotan en torno a ejes fijos al carrier. El número de dientes de los planetas, del sol y del anillo son Z_p , Z_s y Z_r , respectivamente. El número de planetas N depende del diseño y de la potencia a transmitir. La Figura 2.1 muestra el esquema de una transmisión planetaria típica.

La Figura 2.2(a) muestra la cinemática de una transmisión planetaria. La forma más simple de obtener las relaciones entre las frecuencias de rotación de los distintos componentes es suponer que el carrier está en reposo, sumando el opuesto de la frecuencia de rotación del carrier f_c a la frecuencia de rotación de todos los componentes, como se muestra en la Figura 2.2(b) (McFadden, 1991). Notar que ahora el planeta, el sol y el anillo rotan en torno a ejes estacionarios, por lo que la transmisión puede ser analizada como una transmisión de engranajes de ejes fijos. Se observa que la frecuencia de engrane está dada por:

$$f_g = Z_r f_c = Z_p (f_p + f_c) = Z_s (f_s - f_c) \quad (2.1)$$

De particular interés son las frecuencias de falla en un planeta, en el sol y en el anillo, determinadas por:

$$f_p + f_c = f_c \frac{Z_r}{Z_p} \quad (2.2)$$

$$f_s - f_c = f_c \frac{Z_r}{Z_s} \quad (2.3)$$

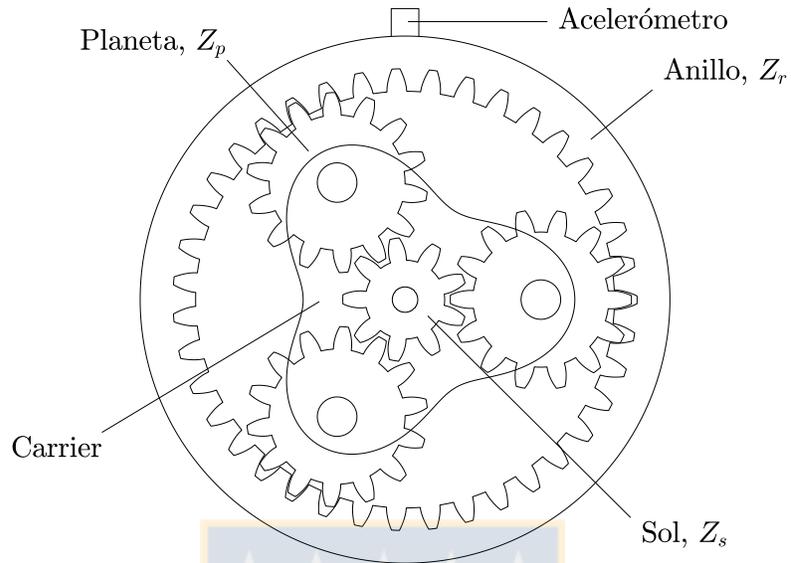
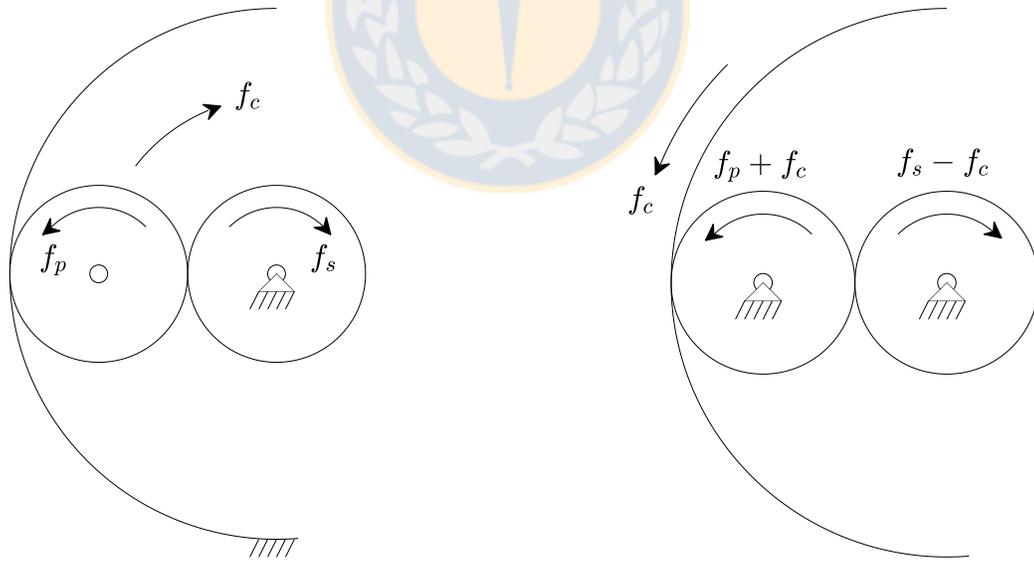


Figura 2.1. Esquema de una transmisión planetaria, con $Z_p = 14$, $Z_s = 9$, $Z_r = 39$ y $N = 3$.



(a) rotación relativa al sistema inercial

(b) rotación relativa al carrier

Figura 2.2. Cinemática de la transmisión planetaria (Adaptación de McFadden, 1991).

$$f_c = f_c \frac{Z_r}{Z_r} \quad (2.4)$$

Finalmente, generalizando las ecuaciones (2.2) a (2.4), se denota el número de dientes del engranaje de interés como Z_{int} y su frecuencia de falla f_{int} como:

$$f_{int} = f_c \frac{Z_r}{Z_{int}} \quad (2.5)$$

2.2. Vibración en transmisiones planetarias

2.2.1. Aceleración transversal

El diagnóstico de fallas mediante análisis de vibraciones en transmisiones planetarias es más complejo que en transmisiones de engranajes ejes fijos, ya que la vibración registrada por un acelerómetro fijo al anillo es la suma de las vibraciones producidas en los múltiples procesos de engrane transmitidas a través de diferentes rutas variables en el tiempo. A modo de ejemplo, la Figura 2.3 muestra la forma de onda y el espectro de la vibración en una transmisión de engranajes de ejes fijos¹ y en una transmisión planetaria para la condición de daño en un planeta, obtenidas a partir de la respuesta de un modelo de parámetros concentrados. Se observa que, producto de la modulación producto del movimiento relativo de los planetas con respecto al acelerómetro existente en la transmisión planetaria (Figura 2.3(d)), se presenta una mayor cantidad de familias de bandas laterales en comparación a la transmisión de engranajes de ejes fijos (Figura 2.3(b)), dificultando el diagnóstico a través de la aceleración transversal. Morales (2016) presenta el análisis espectral de la vibración en transmisiones planetarias del grupo (A)², a través del análisis de la respuesta vibratoria entregada por modelos de tipo fenomenológico:

- (i) para la transmisión sin daño se observan bandas laterales a Nf_c en torno a f_g y sus armónicos, producto del movimiento relativo de los N planetas con respecto al acelerómetro³;
- (ii) para la condición de daño en un planeta se observa una doble modulación, con bandas laterales a $(f_p + f_c)$ producto del engrane del diente dañado y bandas laterales a mf_c producto del movimiento relativo de los planetas con respecto al acelerómetro;
- (iii) para la condición de daño en el sol se observan bandas laterales a $N(f_s - f_c)$ producto del engrane de los N planetas con el diente dañado, bandas laterales a Nf_c producto del movimiento relativo de los planetas con respecto al acelerómetro y bandas laterales a f_s , que tienen su origen en la supresión de componentes, según lo descrito en (Parra, 2017); y,

¹ Aceleración transversal de una transmisión planetaria, considerando el sistema de referencia fijo al carrier.

² De acuerdo a la clasificación presentada por Molina (2012) según la geometría de la transmisión planetaria.

³ Para $N = 1$, se presentan bandas laterales a lf_c en torno a f_g , producto del movimiento relativo del planeta con respecto al acelerómetro. Para $N > 1$, al obtener la vibración total como la suma de la vibración de los N planetas se suprimen las bandas laterales a $lf_c, l \neq N$, debido a la diferencia de fase en la vibración de cada planeta (Molina, 2012).

- (iv) para la condición de daño en el anillo se observan bandas laterales a Nf_c producto del engrane de los N planetas con el diente dañado.

La Tabla 2.1 presenta el resumen del contenido espectral de la aceleración transversal en transmisiones planetarias del grupo (A).

2.2.2. Velocidad y aceleración angular instantánea del sol

El análisis de la velocidad angular instantánea nace como alternativa a la medición de la aceleración transversal en equipos en los que no es posible montar un acelerómetro. A modo de ejemplo, la Figura 2.4 muestra la forma de onda y el espectro de la velocidad angular instantánea del sol en una transmisión de engranajes de ejes fijos y en una transmisión planetaria para la condición de daño en un planeta, obtenidas a partir de la respuesta vibratoria de un modelo de parámetros concentrados. Se observa que ambos espectros presentan la misma cantidad de familias de bandas laterales (Figuras 2.4(b) y 2.4(d)), ya que el movimiento relativo de los planetas con respecto al acelerómetro, en condición de simetría angular de los planetas con respecto al centro de rotación del carrier, no modula a la velocidad angular instantánea del sol. Morales (2016) presenta el análisis espectral de la velocidad angular instantánea del sol en transmisiones planetarias del grupo (A), a través del análisis de la respuesta vibratoria entregada por modelos de tipo de parámetros concentrados:

- (i) Para la transmisión sin daño se observa la componente f_g y sus armónicos sin bandas laterales;
- (ii) para la condición de daño en un planeta se observan bandas laterales a $(f_p + f_c)$ producto del engrane del diente dañado;
- (iii) para la condición de daño en el sol se observan bandas laterales a $N(f_s - f_c)$ producto del engrane de los N planetas con el diente dañado; y,
- (iv) para la condición de daño en el anillo se observan bandas laterales a Nf_c producto del engrane de los N planetas con el diente dañado.

La Tabla 2.2 presenta el resumen del contenido espectral de la velocidad angular instantánea del sol en transmisiones planetarias del grupo (A). Se destaca que, al no verse afectado por el movimiento de relativo de los planetas con respecto al acelerómetro, el contenido espectral de la velocidad angular instantánea del sol presenta una menor cantidad de familias de bandas laterales en comparación al contenido espectral de la aceleración transversal.

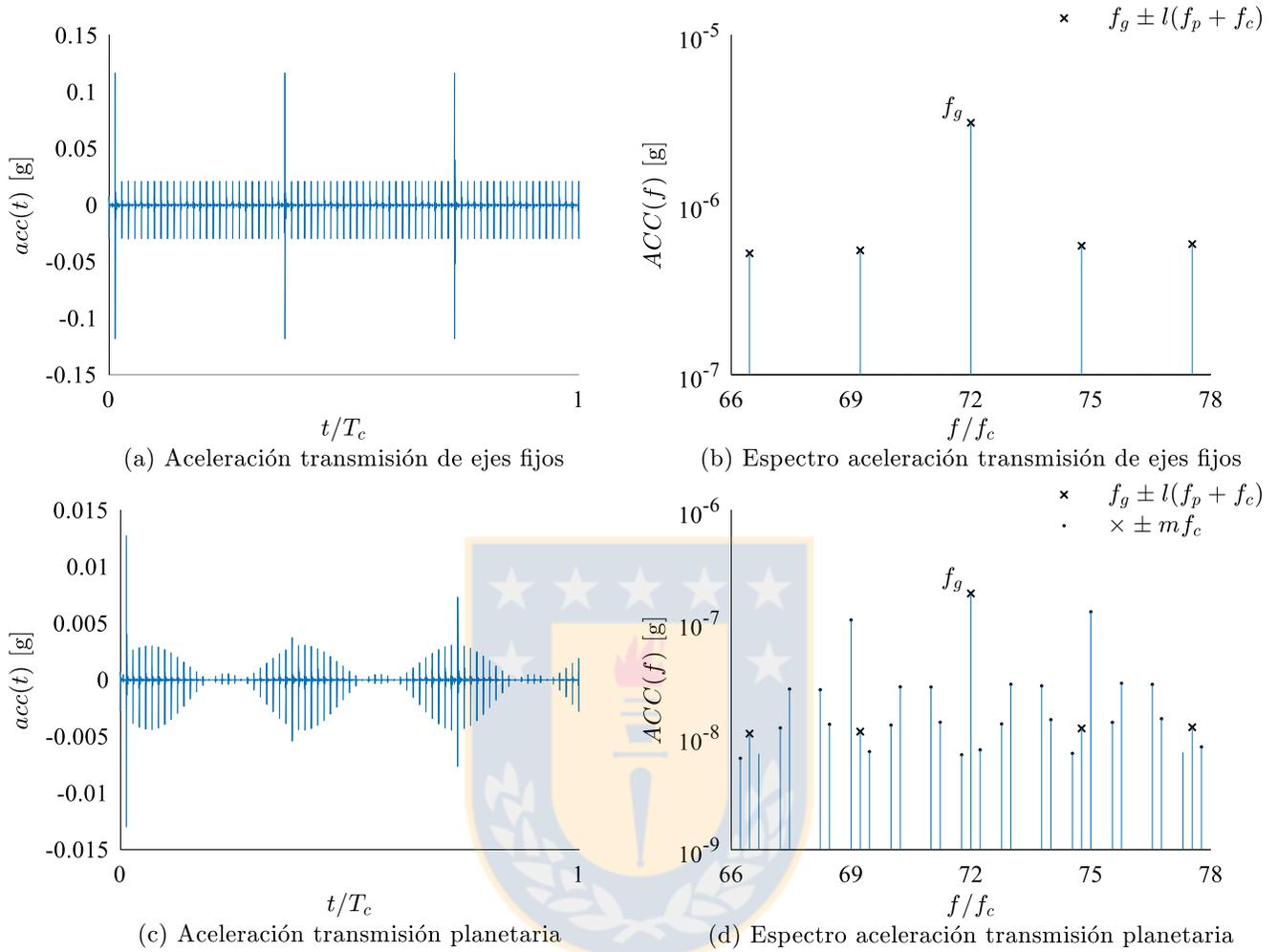


Figura 2.3. Comparación de la aceleración transversal en una transmisión de engranajes de ejes fijos y en una transmisión planetaria, daño en un planeta, con $Z_p = 26$, $Z_s = 18$, $Z_r = 72$ y $N = 3$, $f_s = 1500$ CPM.

Tabla 2.1. Resumen del contenido espectral de la aceleración transversal en una transmisión planetaria del grupo (A).

Componente dañado	Frecuencia de interés f_{int}	Bandas en torno a f_g	Bandas adicionales
Sin daño	—	Nf_c	—
Planeta	$(f_p + f_c) = f_c \frac{Z_r}{Z_p}$	$(f_p + f_c)$	f_c
Sol	$(f_s - f_c) = f_c \frac{Z_r}{Z_s}$	$N(f_s - f_c)$	Nf_c, f_s
Anillo	f_c	Nf_c	—

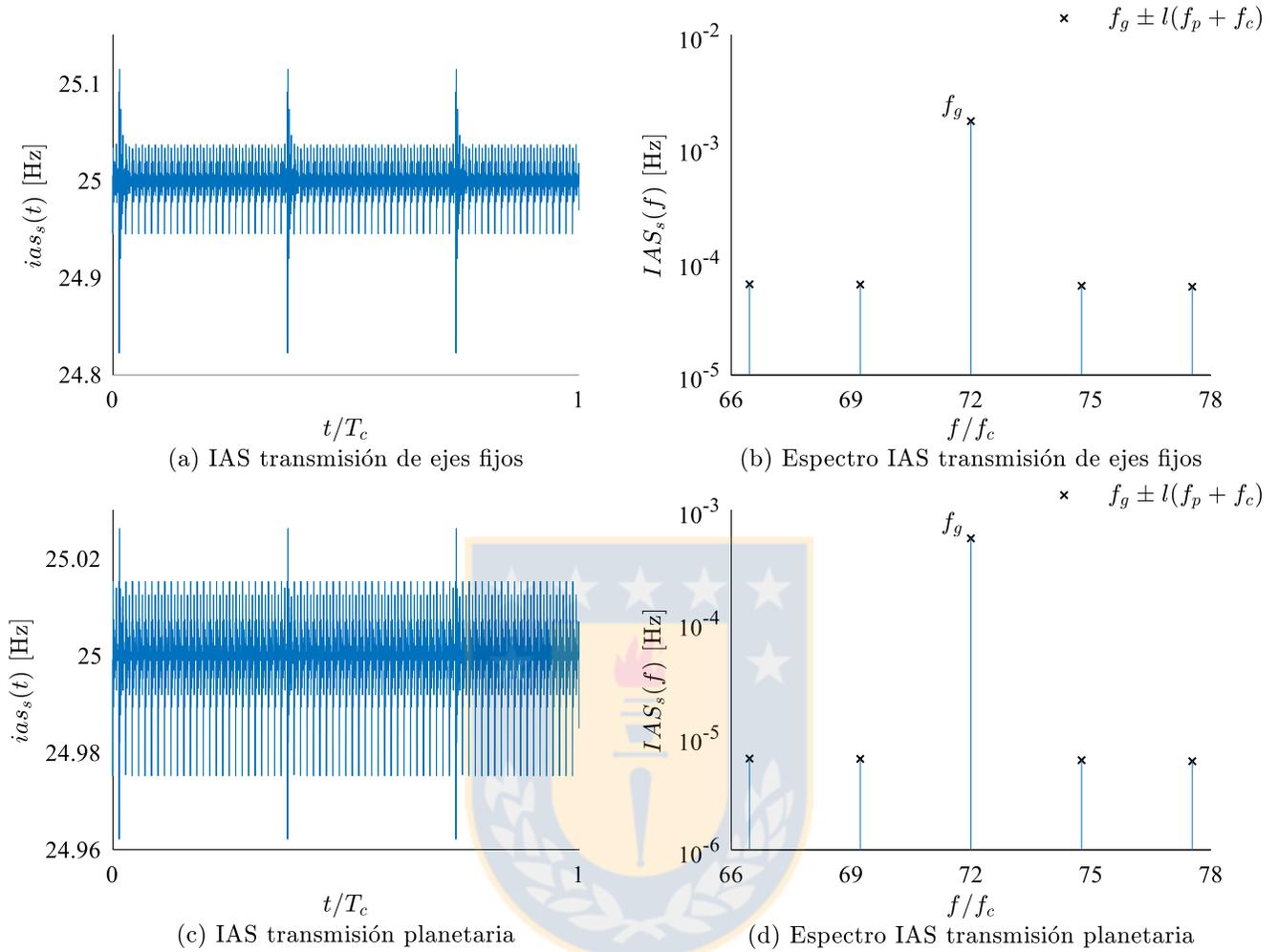


Figura 2.4. Comparación de la velocidad angular instantánea del sol en una transmisión de engranajes de ejes fijos y en una transmisión planetaria, daño en planeta 1, con $Z_p = 26, Z_s = 18, Z_r = 72$ y $N = 3, f_s = 1500$ CPM.

Tabla 2.2. Resumen del contenido espectral de la velocidad angular instantánea del sol en una transmisión planetaria del grupo (A).

Componente dañado	Frecuencia de interés f_{int}	Bandas en torno a f_g
Sin daño	—	—
Planeta	$(f_p + f_c) = f_c \frac{Z_r}{Z_p}$	$(f_p + f_c)$
Sol	$(f_s - f_c) = f_c \frac{Z_r}{Z_s}$	$N(f_s - f_c)$
Anillo	f_c	Nf_c

CAPÍTULO 3

Descripción del desarrollo experimental

El desarrollo experimental de este trabajo comienza con la ejecución de diferentes mediciones en el banco de ensayos para diferentes condiciones mecánicas y diferentes condiciones de operación. A continuación, se entregan las especificaciones generales del banco de ensayos utilizado y del *hardware* de adquisición de datos. Además, se detallan las diferentes condiciones mecánicas y condiciones de operación ensayadas.

3.1. Descripción general del banco de ensayos

La Figura 3.1 muestra el banco de ensayos utilizado, el cual se encuentra en el Laboratorio de Vibraciones Mecánicas del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción. El banco de ensayos consta de un freno magnético, la transmisión planetaria estudiada (ver Tabla 3.1) y un motor eléctrico equipado con un encoder óptico de 2048 ranuras instalado en su extremo libre; adicionalmente, para la medición de la velocidad angular instantánea del sol, se dispone de un encoder óptico de 5000 ranuras acoplado al eje del sol. El torque resistente aplicado a la transmisión es función del voltaje DC aplicado al freno. Esta señal de voltaje es generada a través de una tarjeta digital/análogo de tal forma de poder reproducir las mismas condiciones de operación durante los diferentes ensayos. El torque resistente máximo está limitado por la disipación de calor propia del freno.



Figura 3.1. Banco de ensayos del LVM UdeC.

Tabla 3.1. Características de la transmisión planetaria del banco de ensayos.

Parámetro	Valor
N	3
Z_p	26
Z_s	18
Z_r	72
$r_t = f_s/f_c = (Z_r + Z_s)/Z_s$	5

3.2. Descripción general del sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos consta de un chasis NI cDAQ-9178 con dos tarjetas de adquisición de datos: una tarjeta NI 9234, utilizada para registrar la aceleración transversal; y, una tarjeta NI 9411, utilizada para registrar el tiempo entre pulsos del encoder óptico. Para la medición de la aceleración transversal se utiliza un acelerómetro marca IMI, modelo 603C01, de sensibilidad 100 mV/g .

La aceleración transversal es muestreada a una tasa de $F_s = 12800 \text{ [Hz]}$. El reloj del chasis NI cDAQ-9178 utilizado para contar el tiempo entre pulsos del encoder óptico tiene una frecuencia de muestreo de 80 MHz . El software de adquisición de datos es desarrollado en la plataforma NI LabVIEW 2009 y el software de procesamiento de señales es desarrollado en la plataforma MATLAB 2016.

3.3. Condiciones mecánicas ensayadas

Para evaluar las diferentes técnicas para el diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias se definen cuatro condiciones mecánicas a ensayar, las cuales son descritas en la Tabla 3.2. El daño en los diferentes componentes es inducido manualmente a través de desgaste mecánico. Para la condición de daño local en un planeta se evalúa el caso en que el flanco dañado engrana con el sol. Las Figuras 3.2, 3.3 y 3.4 muestran el detalle del daño local en el sol, en el planeta y en el anillo respectivamente.

Tabla 3.2. Condiciones mecánicas ensayadas.

Componente dañado	Observación
(a) -	Sin daño
(b) Sol	Daño severo
(c) Planeta 1	Flanco dañado engrana con el sol
(d) Anillo	Dos flancos consecutivos dañados

3.4. Condiciones de operación ensayadas

Para evaluar las diferentes técnicas para el diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias se definen nueve condiciones de operación constantes y nueve condiciones de operación variables.

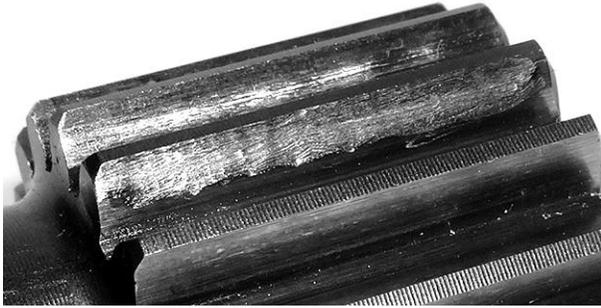


Figura 3.2. Daño local en el sol.



Figura 3.3. Daño local en un planeta.

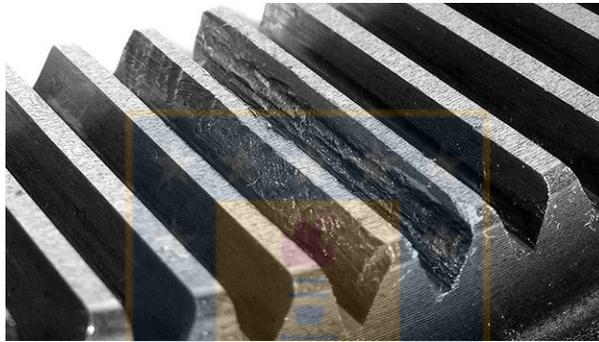


Figura 3.4. Daño local en el anillo.

Tabla 3.3. Condiciones de operación constantes ensayadas.

	f_s [CPM]	f_c [CPM]	T_l [Nm]	P [W]
1500.1	1500	300	7,2	226,2
1500.2	1500	300	10,8	339,3
1500.3	1500	300	21,6	678,6
1000.1	1000	200	10,8	226,2
1000.2	1000	200	16,2	339,3
1000.3	1000	200	32,4	678,6
500.1	500	100	21,6	226,2
500.2	500	100	32,4	339,3
500.3	500	100	64,8	678,6

Para los ensayos bajo condiciones de operación constantes se definen nueve combinaciones de velocidad de rotación y torque, las cuales son descritas en la Tabla 3.3. El criterio utilizado para definir las diferentes combinaciones consiste en definir tres niveles de carga para cada velocidad de rotación a ensayar, de tal forma de mantener constante la potencia al eje. Así, se tiene un parámetro de referencia constante al momento de comparar entre los diferentes ensayos. A modo de ejemplo, se observa que las

condiciones de operación 1500.1, 1000.1 y 500.1 tienen distinta velocidad de rotación y distinto torque resistente, pero tienen la misma potencia al eje.

Para los ensayos bajo condiciones de operación variables se definen tres patrones de carga variable para cada velocidad de rotación media a ensayar, los cuales son presentados en la Figura 3.5. Cada patrón de carga es construido a partir de la interpolación lineal de un vector aleatorio. Este vector representa la razón de cambio del torque con respecto al tiempo. Posteriormente, se integra la señal obtenida y se normaliza según su valor RMS global; de esta forma, se asegura que tanto el patrón de carga como su primera derivada sean continuos. Finalmente, el torque resistente $T_l(t)$ se obtiene amplificando el patrón de carga normalizado por el torque medio máximo correspondiente a cada velocidad de rotación. La Figura 3.6 presenta esquemáticamente el proceso de construcción de un patrón de carga variable.

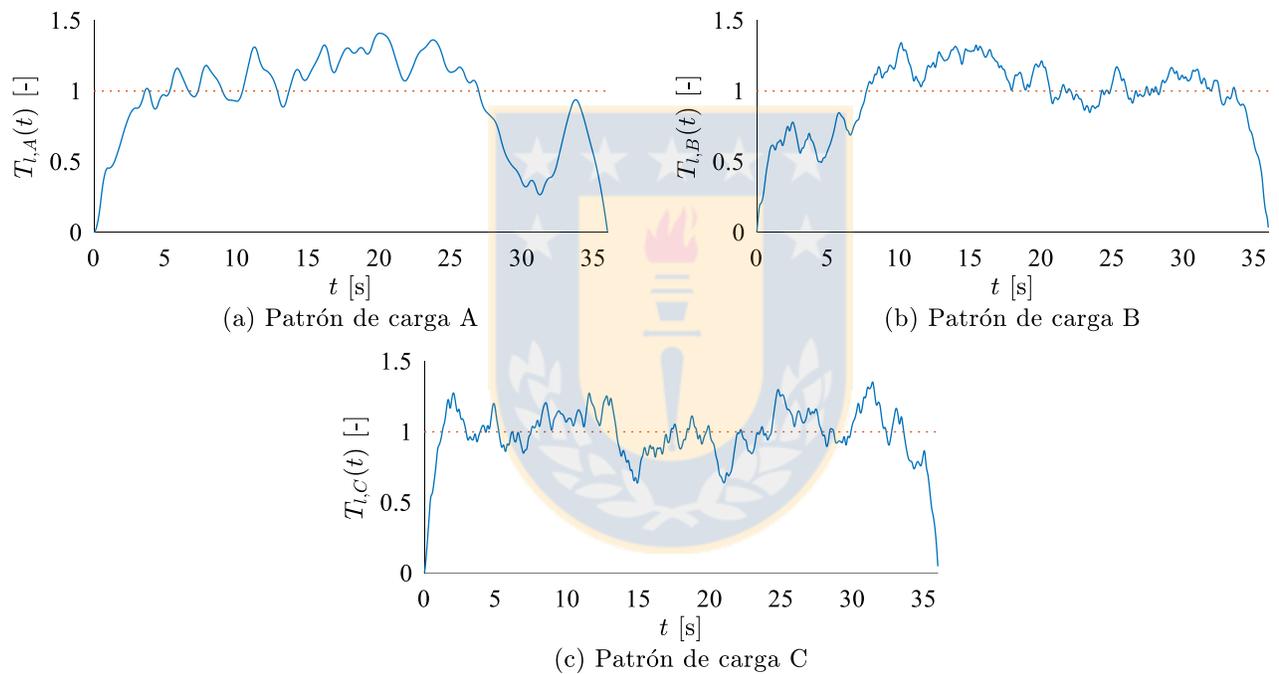


Figura 3.5. Patrones de carga variable utilizados.

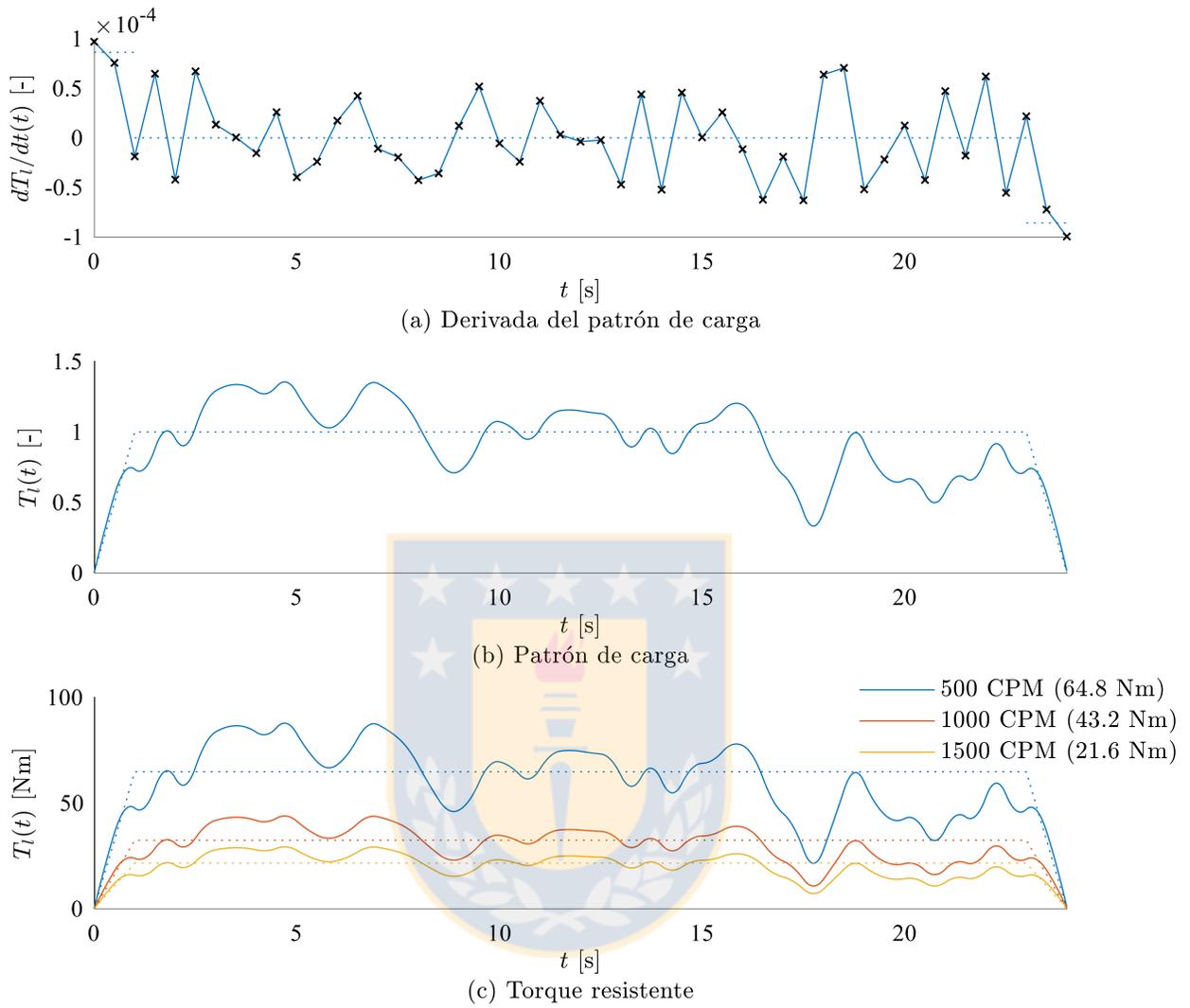


Figura 3.6. Construcción de un patrón de carga variable.

CAPÍTULO 4

Adquisición y procesamiento de datos

En este capítulo se presenta el proceso de adquisición de datos, se detallan las condiciones que se deben satisfacer para aplicar correctamente las técnicas de procesamiento de señales utilizadas y se describe el procesamiento de señales realizado.

4.1. Acondicionamiento de señales

4.1.1. Aceleración transversal

La señal de aceleración, obtenida a partir de un acelerómetro fijo al anillo, es muestreada a una tasa de $F_s = 12800 \text{ Hz}$. En paralelo, se obtiene el tiempo entre pulsos del encoder óptico, con el objetivo de realizar el seguimiento de orden de la posición angular del sol y compensar las variaciones de velocidad en torno a la velocidad de rotación media. Para identificar correctamente las componentes de interés en el espectro debe registrarse un número entero de ciclos de la frecuencia de interés f_{int} , esto es:

$$\frac{T_R}{T_{int}} \in \mathbb{N} \quad (4.1)$$

Por otra parte, se tiene que:

$$\begin{aligned} \frac{T_R}{T_{int}} &= \frac{N_{rev,c} T_c}{T_{int}} \\ \Leftrightarrow \frac{T_R}{T_{int}} &= \frac{N_{rev,c} f_{int}}{f_c} \\ \Leftrightarrow \frac{T_R}{T_{int}} &= N_{rev,c} \frac{Z_r}{Z_{int}} \\ \Leftrightarrow \frac{T_R}{T_{int}} &= N_{rev,s} \frac{r_t Z_r}{Z_{int}} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Por lo tanto, para identificar correctamente las componentes de interés en el espectro debe cumplirse que:

$$N_{rev,s} \frac{r_t Z_r}{Z_{int}} \in \mathbb{N} \quad (4.3)$$

Para la transmisión estudiada, se puede demostrar que $N_{rev,s} = nr_t Z_p$ satisface la condición (4.3), por lo que se registran $N_{rev,c} = 2r_t Z_p = 260$ revoluciones del sol, lo que permite identificar correctamente las componentes de interés f_{int} para la condición de daño en los diferentes componentes. Además, para calcular correctamente el promedio sincrónico $tsa_{int}\{acc(t)\}$ y la señal diferencia $diff_{int}\{acc(t)\}$ debe cumplirse que el número de muestras por ciclo de la frecuencia de interés f_{int} sea entero, esto es:

$$\frac{F_S}{f_{int}} \in \mathbb{N} \quad (4.4)$$

Por otra parte, se tiene que:



$$\begin{aligned} \frac{F_S}{f_{int}} &= \frac{F_S Z_{int}}{f_c Z_r} \\ \Leftrightarrow \frac{F_S}{f_{int}} &= \frac{F_S r_t Z_{int}}{f_s Z_r} \\ \Leftrightarrow \frac{F_S}{f_{int}} &= f_{s,s} \frac{r_t Z_{int}}{Z_r} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Donde se ha definido la frecuencia de muestro cíclica con respecto a la frecuencia de rotación del sol como $f_{s,s} = F_S / f_s$. Por lo tanto, para calcular correctamente el promedio sincrónico $tsa_{int}\{acc(t)\}$ y la señal diferencia $diff_{int}\{acc(t)\}$ debe cumplirse que:

$$f_{s,s} \frac{r_t Z_{int}}{Z_r} \in \mathbb{N} \quad (4.6)$$

Como $Z_{int} \in \mathbb{N}$, de forma general debe cumplirse que:

$$f_{s,s} \frac{r_t}{Z_r} \in \mathbb{N} \quad (4.7)$$

Es decir, $F_{s,s}$ debe ser múltiplo de Z_r/r_t . Para asegurar que se cumpla la condición (4.7) y poder calcular correctamente el promedio sincrónico $tsa_{int}\{acc(t)\}$ y la señal diferencia $diff_{int}\{acc(t)\}$, se remuestrea angularmente la señal de aceleración transversal a una tasa de:

$$f_{s,s} = \text{fix} \left(\frac{F_s/f_s}{Z_r/r_t} \right) Z_r/r_t \text{ [muestras/rev}_s\text{]} \quad (4.8)$$

De esta forma, se tiene una frecuencia máxima en el espectro de $f_{max} = f_{s,s}f_s/2$ [Hz]. Para evitar problemas de *aliasing* al remuestrear angularmente la aceleración transversal, y considerando que existen variaciones en torno a la velocidad de rotación media, se aplica un filtro pasa bajo⁴ a la señal con frecuencia de corte $f_{stop} = 0,95f_{max}$ [Hz]. La Tabla 4.1 muestra la frecuencia de muestreo cíclica con respecto a la frecuencia de rotación del sol $f_{s,s}$ y la frecuencia máxima en el espectro para cada condición de operación.

A modo de ejemplo, la Figura 4.1 muestra el resultado del seguimiento de orden de la aceleración transversal, para la transmisión sin daño. En el espectro determinado a partir de la señal temporal (espectro en Hz) se observan las distintas componentes dispersas en un determinado ancho de banda, producto de las variaciones en la velocidad angular. Por otra parte, en el espectro determinado a partir de la señal en el dominio angular (espectro en *orders*) se observa la energía concentrada en sólo una componente.

Para realizar un diagnóstico incipiente es necesario que el ancho de banda seleccionado abarque al menos una zona resonante, ya que en las primeras etapas del daño las componentes espectrales asociadas a impactos serán visibles en dichas zonas. Para identificar las zonas resonantes de la transmisión y validar la frecuencia de muestreo utilizada se realiza un ensayo de partida, en el cual se alcanza una velocidad de rotación de $f_s = 2400$ CPM en 40 segundos. Las Figuras 4.2(a) y 4.2(b) muestran la representación en tiempo-frecuencia y revolución-order (Saavedra y González, 2005) de la aceleración transversal, donde no se distinguen claramente las zonas resonantes de la transmisión. La Figura 4.2(c) muestra el diagrama de Bode en amplitud de los armónicos de la frecuencia de engrane, donde se observan cuatro zonas resonantes⁵. El hecho de que bajo los 6400 Hz existan al menos cuatro zonas resonantes, valida el uso de una frecuencia de muestreo de $F_s = 12800$ Hz ya que permite identificar las componentes asociadas al daño en etapas tempranas.

⁴ El filtro utilizado consiste en calcular la transformada de Fourier, eliminar todas las componentes de frecuencia superior a la frecuencia de corte y calcular la transformada de Fourier inversa.

⁵ Cabe destacar que las zonas resonantes descritas varían ya que no se puede asegurar que el montaje del banco de ensayos sea idéntico para los diferentes ensayos realizados.

Tabla 4.1. Frecuencia de muestreo cíclica para la aceleración transversal.

f_s [CPM]	$f_{s,s}$ [muestras/rev _s]	f_{max} [orders]
500	1526,4	$3816f_c = 53f_g$
1000	763,2	$1908f_c = 26,5f_g$
1500	504	$1260f_c = 17,5f_g$

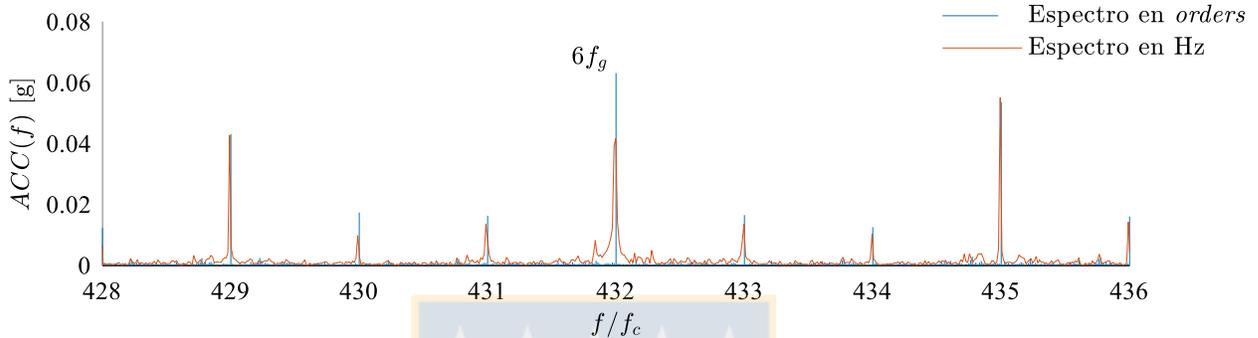


Figura 4.1. Comparación del espectro de la vibración, espectro en Hz y espectro en orders, transmisión sin daño, $f_s = 500$ CPM, $T_l = 64,8$ Nm.

4.1.2. Velocidad y aceleración angular instantánea del sol

La velocidad angular instantánea del sol $ias_s(i\Delta\theta)$ se determina a partir del tiempo entre pulsos Δt_i del encoder óptico según:

$$ias_s(i\Delta\theta) = ias_{s_i} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t_i} = \frac{1/N_{enc}}{\Delta t_i}, i = 1, 2, \dots, N_{enc} N_{rev,s} + 1 \quad (4.9)$$

Luego, la aceleración angular instantánea del sol $iaa_s(i\Delta\theta)$ se calcula como:

$$iaa_s(i\Delta\theta) = iaa_{s_i} = \frac{\Delta ias_{s_i}}{\Delta t_i} = \frac{ias_{s_{i+1}} - ias_{s_i}}{\Delta t_i}, i = 1, 2, \dots, N_{enc} N_{rev,s} \quad (4.10)$$

De manera análoga al caso de la aceleración transversal, y considerando que para identificar correctamente las componentes de interés f_{int} en el espectro debe cumplirse la condición (4.4), se registran $N_{rev,c} = 2r_t Z_p = 260$ revoluciones del sol. La Figura 4.3 muestra el espectro de la aceleración angular instantánea del sol para $f_s = 500, 1000$ y 1500 CPM. Debido al proceso de diferenciación de la

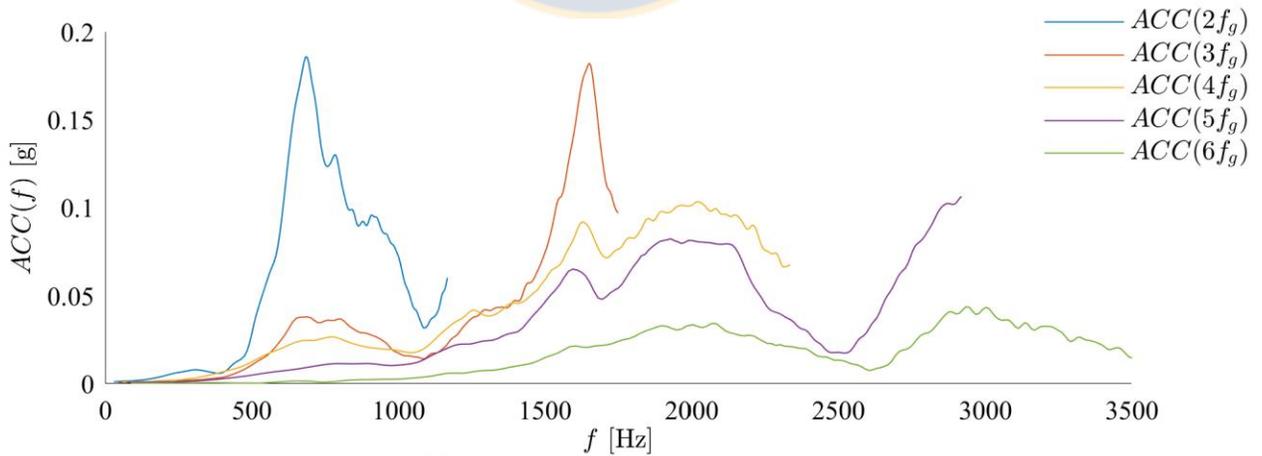
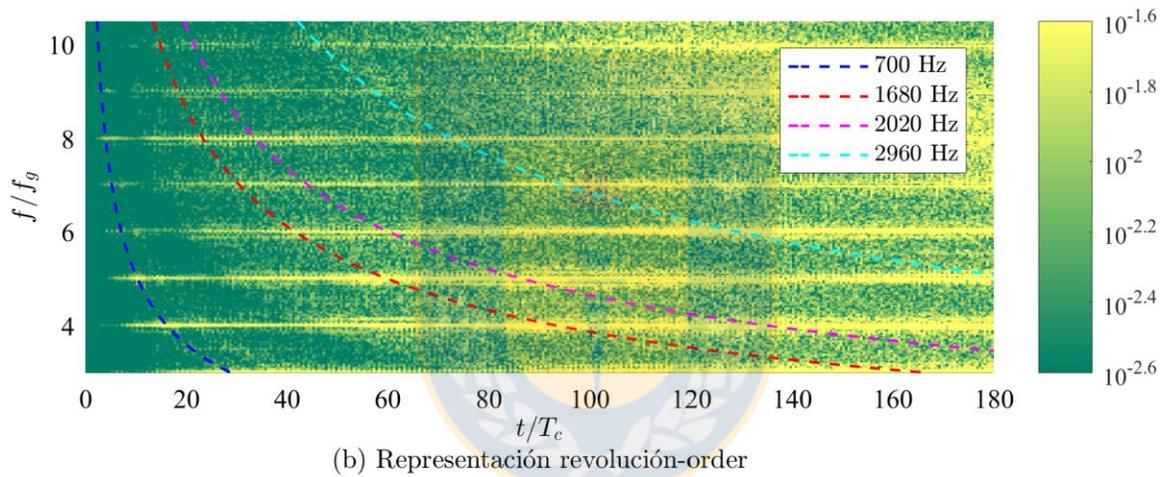
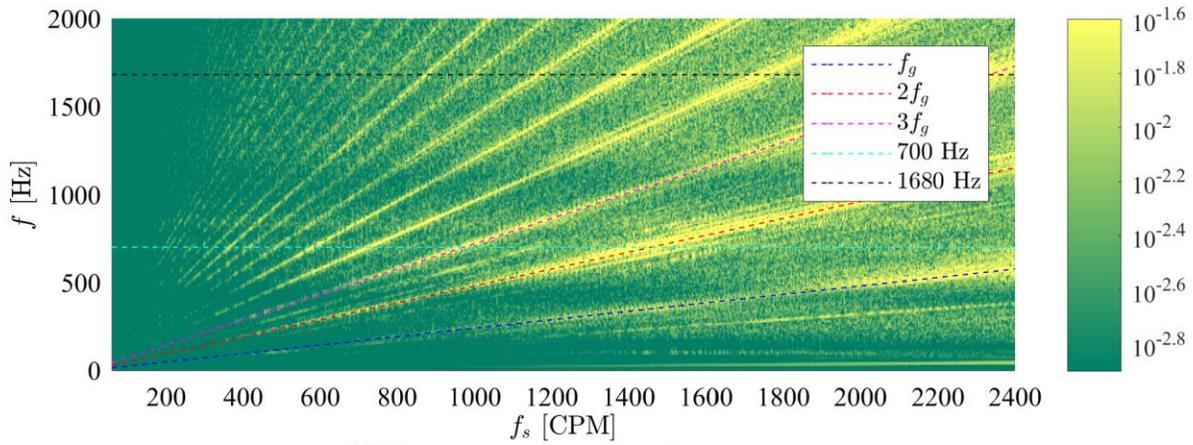


Figura 4.2. Aceleración transversal, ensayo de partida, $f_s = 0 - 2400$ CPM.

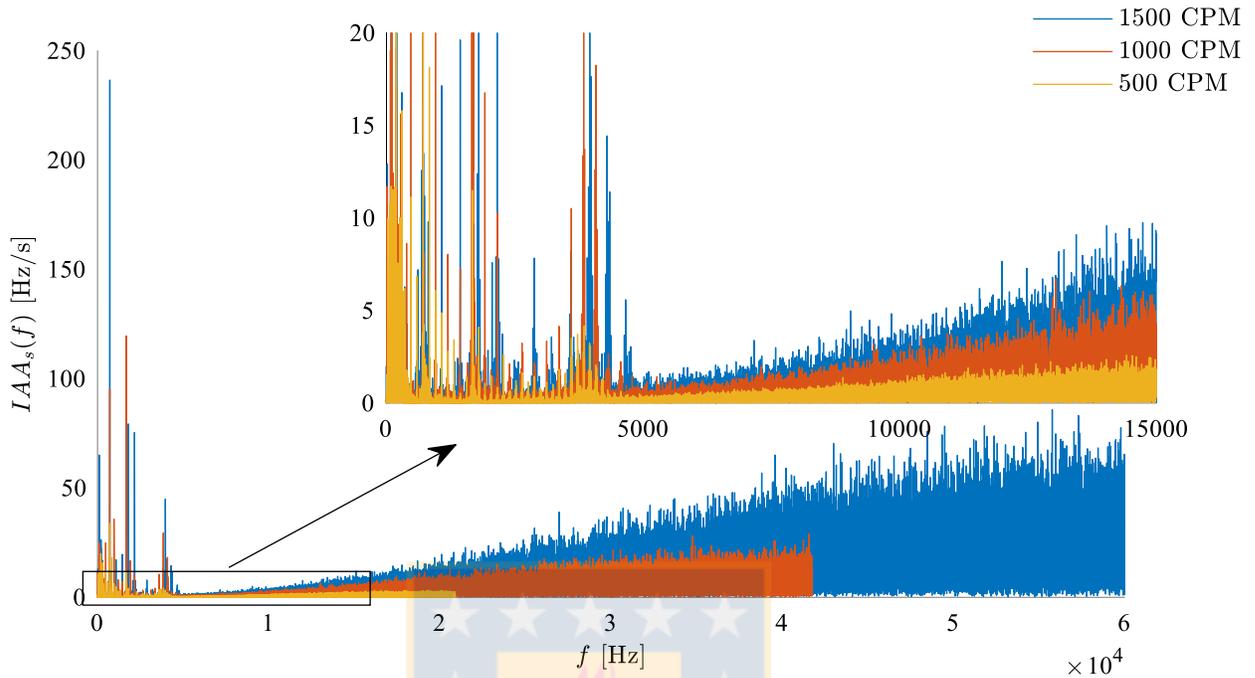


Figura 4.3. Espectro de la aceleración angular instantánea del sol, transmisión sin daño, $f_s = 1500, 1000$ y 500 CPM.

velocidad angular instantánea, desde $f = 5000$ Hz se observa un aumento en la amplitud del ruido en el espectro⁶; de acuerdo a esto, y considerando que para calcular correctamente el promedio sincrónico y la señal diferencia debe cumplirse la condición (4.8), se aplica un filtro pasa bajos a la aceleración y velocidad angular instantánea con una frecuencia de corte:

$$f_{stop} = f_{max} = \text{fix} \left(\frac{5000 \text{ Hz}/f_s}{Z_r/r_t} \right) Z_r/r_t \text{ [orders]} \quad (4.11)$$

y se remuestrea angularmente cada señal a una tasa de $f_{S,S} = 2f_{stop}$ [orders]. La Tabla 4.2 muestra la frecuencia de muestreo cíclica con respecto a la frecuencia de rotación del sol $f_{S,S}$ y la frecuencia máxima en el espectro para cada condición de operación.

La Figura 4.4 muestra la aceleración angular instantánea del sol registrada durante un ensayo de partida. Se observa la presencia de las tres primeras zonas resonantes descritas en la Figura 4.2 y una cuarta zona resonante a 3800 Hz. Se descarta el origen de esta última zona resonante como una frecuencia natural

⁶ De forma análoga al fenómeno de la “pendiente de ski” observado al integrar una señal.

Tabla 4.2. Frecuencia de muestreo cíclica para la velocidad angular instantánea.

f_s [CPM]	$f_{s,s}$ [muestras/rev _s]	f_{max} [orders]
500	1195,2	$2988f_c = 41,5f_g$
1000	509,4	$1476f_c = 20,5f_g$
1500	388,8	$972f_c = 13,5f_g$

propia del encoder debido a que en mediciones realizadas en otro banco de ensayos utilizando el mismo encoder no se observa dicha zona resonante. De manera análoga al caso de la aceleración transversal, el hecho de que bajo los 5000 Hz existan al menos cuatro zonas resonantes, valida el uso de una frecuencia de corte $F_{stop} = 5000$ Hz ya que permite identificar las componentes asociadas al daño en etapas tempranas.

4.2. Procesamiento de señales

Las técnicas de procesamiento de señales utilizadas tienen su origen en el análisis de la forma de onda y del espectro de las diferentes señales adquiridas. El espectro es la descomposición en frecuencias de una señal y se obtiene a partir de la transformada de Fourier; de esta forma, es posible identificar la componente a la frecuencia de engrane, sus armónicos y sus bandas laterales.

Adicionalmente, se trabaja con el análisis de la señal diferencia $diff_{int}\{x(t)\}$, que se obtiene a partir de la aplicación de una serie de filtros sobre la señal $x(t)$, con el objetivo de aislar la contribución vibratoria del engranaje de interés y encontrar perturbaciones producto de impactos armónicos a la frecuencia de interés f_{int} (Lebold et al., 2000). A continuación, se detalla el proceso de construcción de la señal diferencia $diff_{int}\{x(t)\}$:

- (i) El primer paso para obtener la señal diferencia consiste en aplicar un filtro pasa altos, con el objetivo de eliminar componentes vibratorias asociadas al desbalanceamiento residual y al comportamiento eléctrico del motor⁷. En el presente informe, la frecuencia de corte utilizada es $f_{stop} = f_g$.
- (ii) Luego, se calcula el promedio sincrónico $tsa_{int}\{x(t)\}$ con el objetivo de aislar la contribución vibratoria del engranaje de interés. Desde el punto de vista del análisis espectral, el cálculo del promedio sincrónico $tsa_{int}\{x(t)\}$ es equivalente a filtrar la componente f_{int} y sus armónicos (Braun, 2011), por lo que el contenido espectral de la señal $tsa_{int}\{x(t)\}$ consiste sólo en componentes armónicas a f_{int} .
- (iii) Se calcula la señal residual⁸ $res_{int}\{x(t)\}$ eliminando las componentes armónicas a la frecuencia de engrane f_g con el objetivo de eliminar de la señal el patrón regular o sin daño del proceso de engrane, aislando algún posible síntoma vibratorio producto de un daño en el engranaje de interés.

⁷ Con el objetivo de identificar las componentes asociadas al comportamiento eléctrico del motor, se realiza en un ensayo de partida con el motor desacoplado de la transmisión, el cual se presenta en la Figura 4.5.

⁸ Otra forma de calcular la señal diferencia es aislar el patrón regular del proceso de engrane como el promedio sincrónico de frecuencia $f_{int} = f_g$ y restarlo al promedio sincrónico del engranaje de interés.

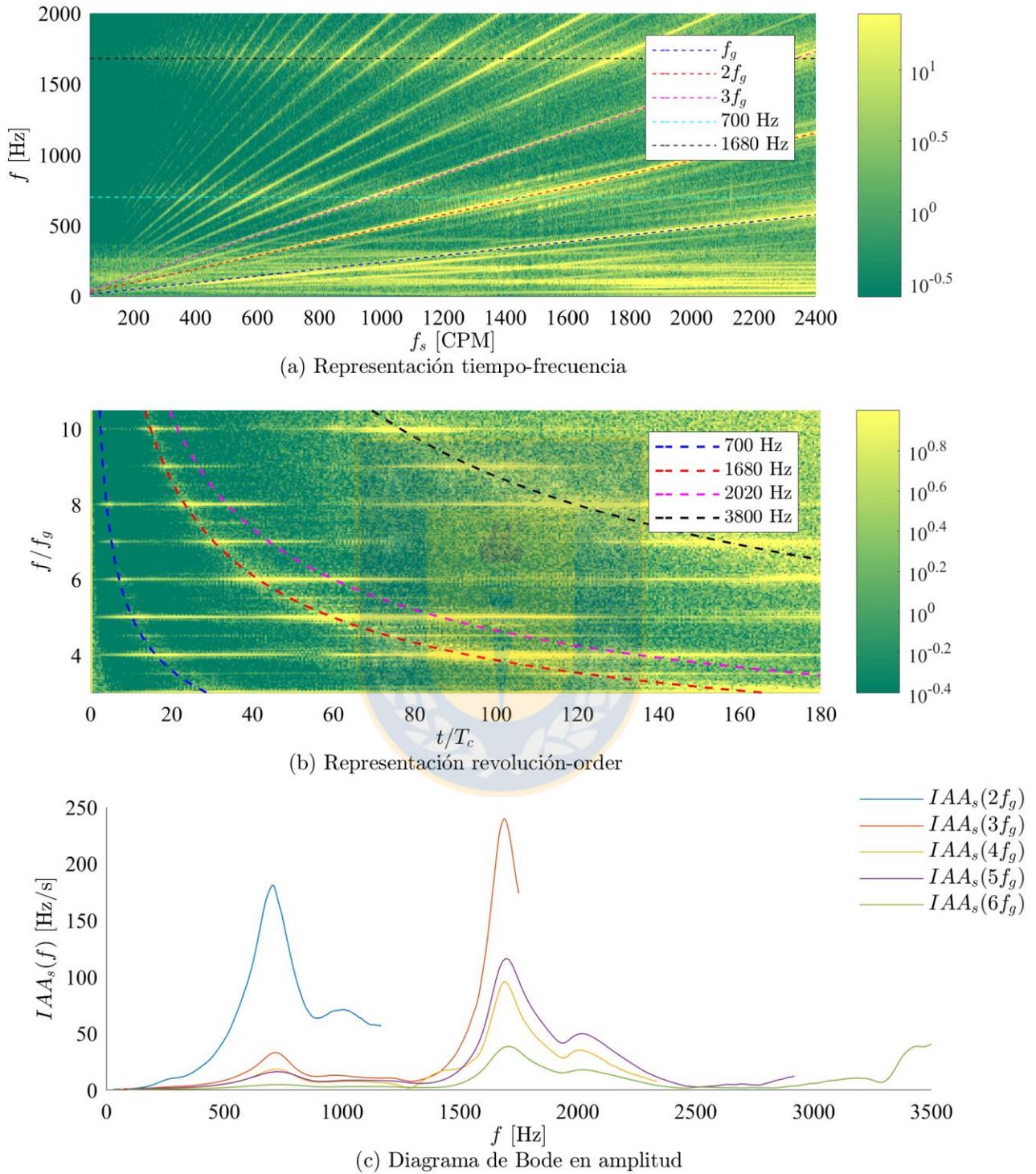
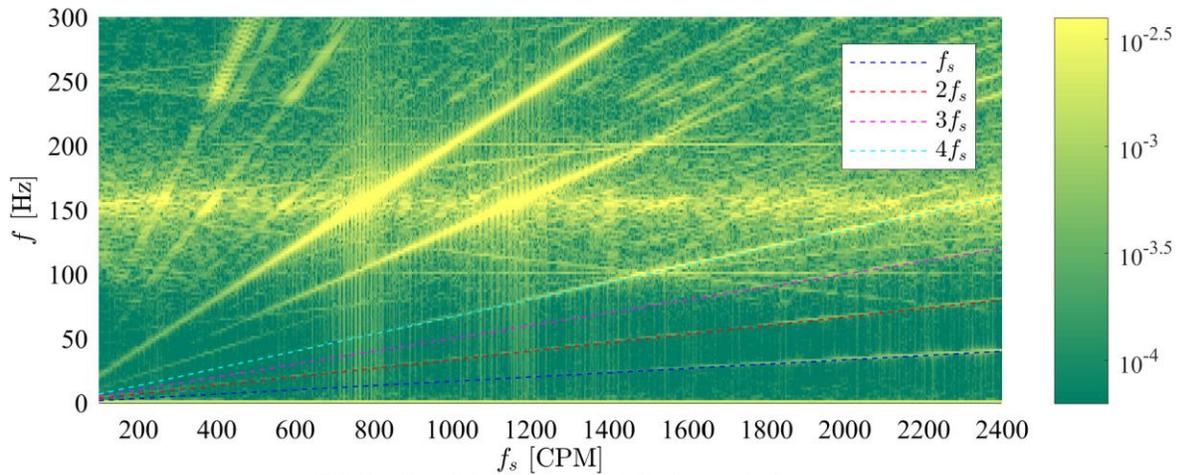
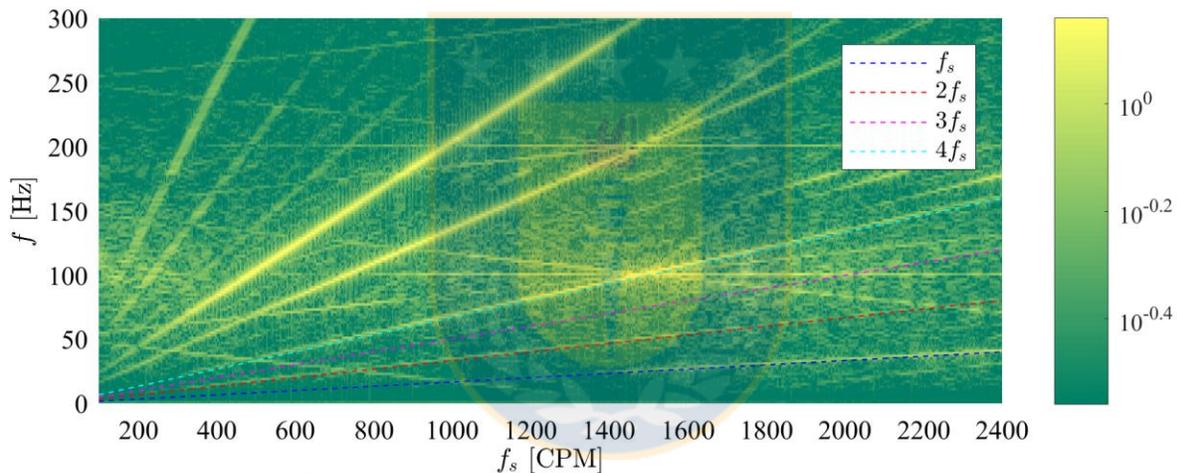


Figura 4.4. Aceleración angular instantánea del sol, ensayo de partida, $f_s = 0 - 2400$ CPM.



(a) Aceleración transversal (lado motor)



(b) Aceleración angular instantánea (encoder lado motor)

Figura 4.5. Ensayo de partida, motor desacoplado, $f_s = 0 - 2400$ CPM.

- (iv) Finalmente, la señal diferencia $diff_{int}\{x(t)\}$ se obtiene al eliminar las bandas laterales de primer orden en torno a f_g y sus armónicos, es decir, se eliminan las componentes a $lf_g \pm f_{int}$, con el objetivo de eliminar posibles modulaciones sincrónicas a f_{int} producto de excentricidad o desalineamiento y resaltar modulaciones a mayor frecuencia producto de impactos.

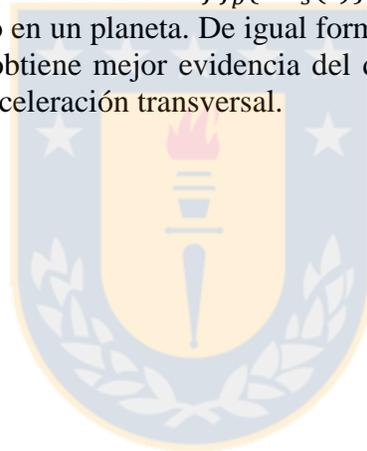
Como indicador de la condición mecánica se presenta el $FM4$, que se utiliza para detectar cambios en el patrón normal de vibración producto de daño en un número reducido de dientes (Lebold et al., 2000). El $FM4$ se calcula como el *kurtosis* de la señal diferencia, esto es:

$$FM4[x] = ku[diff\{x\}] = \frac{n \sum_{i=1}^n \left(diff_i\{x\} - \overline{diff\{x\}} \right)^4}{\left(\sum_{i=1}^n \left(diff_i\{x\} - \overline{diff\{x\}} \right)^2 \right)^2} \quad (4.12)$$

así, la presencia de perturbaciones aisladas producto de un daño local lleva a un aumento del $FM4$.

A modo de ejemplo, la Figura 4.6 muestra las diferentes etapas del proceso de construcción de la señal diferencia de la aceleración transversal $diff_p\{acc(t)\}$, para la condición de daño en un planeta. En este caso, el resultado representa la vibración promedio de los N planetas de la transmisión. Se observa que, a pesar de que en la señal sin procesar no se distingue ningún síntoma que advierta el daño en el planeta, con la aplicación de cada filtro se distingue de mejor forma la perturbación producto del engrane del flanco dañado, lo que se evidencia además en un aumento del *kurtosis*.

De forma análoga, la Figura 4.7 muestra las diferentes etapas del proceso de construcción de la señal diferencia de la velocidad angular instantánea $diff_p\{ias_s(t)\}$ obtenida a partir del encoder lado planetario, para la condición de daño en un planeta. De igual forma que en la Figura 4.6 se observa que con la aplicación de cada filtro se obtiene mejor evidencia del daño, llegando incluso a presentar un *kurtosis* mayor que en el caso de la aceleración transversal.



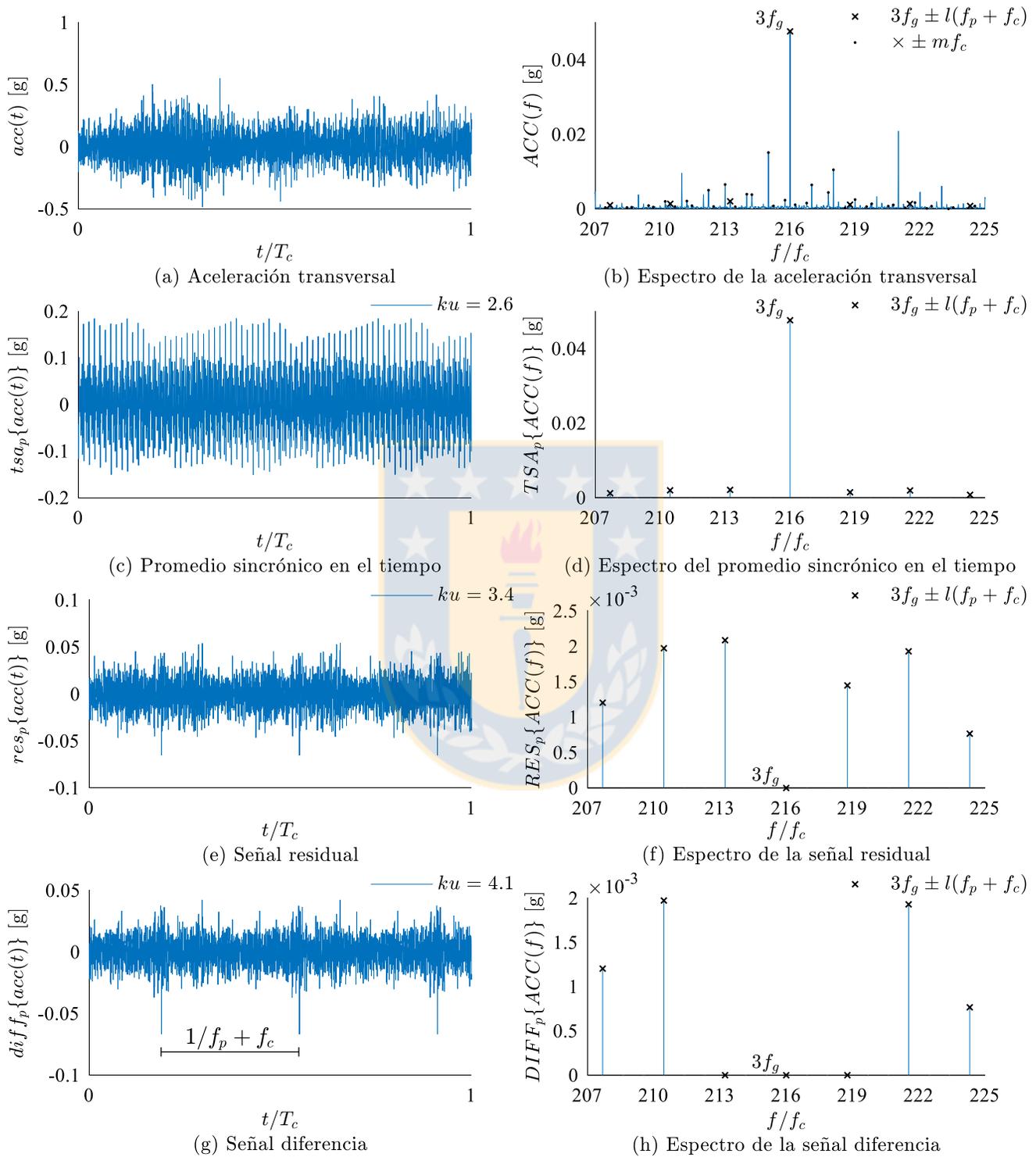


Figura 4.6. Construcción de la señal diferencia, aceleración transversal, daño en un planeta, $f_s = 1000$ CPM, $T_l = 16,2$ Nm

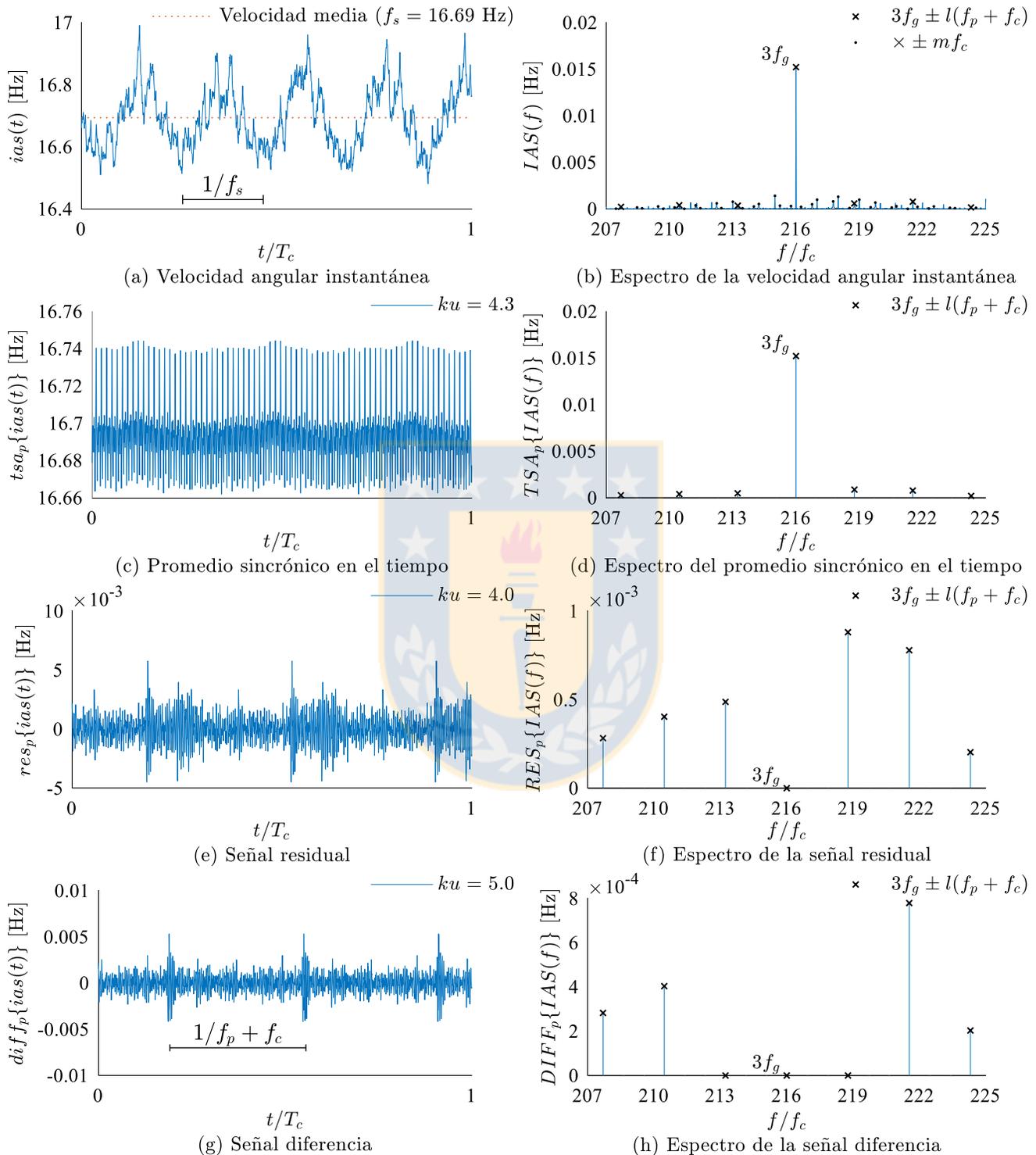


Figura 4.7. Construcción de la señal diferencia, velocidad angular instantánea, daño en un planeta, $f_s = 1000$ CPM, $T_l = 16,2$ Nm

CAPÍTULO 5

Discusión preliminar de las técnicas a evaluar

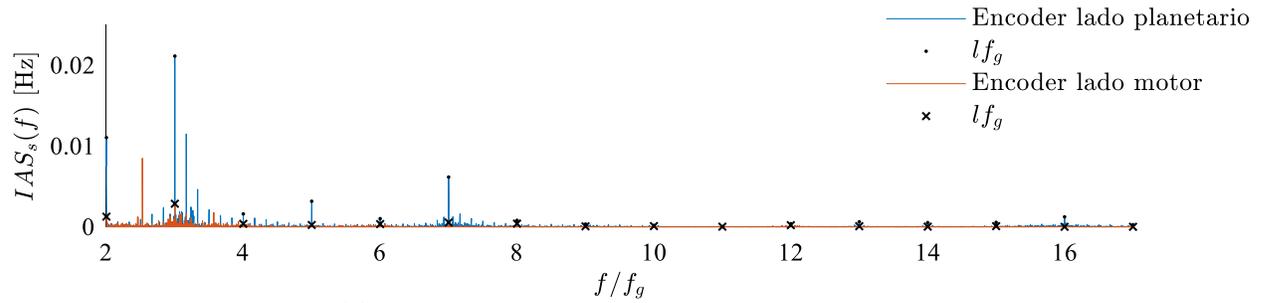
A continuación se presentan las diferentes consideraciones que se tienen al momento de realizar el procesamiento de datos de la aceleración transversal y de la velocidad y aceleración angular instantánea del sol, las cuales son utilizadas en los Capítulos 6 y 7.

5.1. Selección del encoder a utilizar

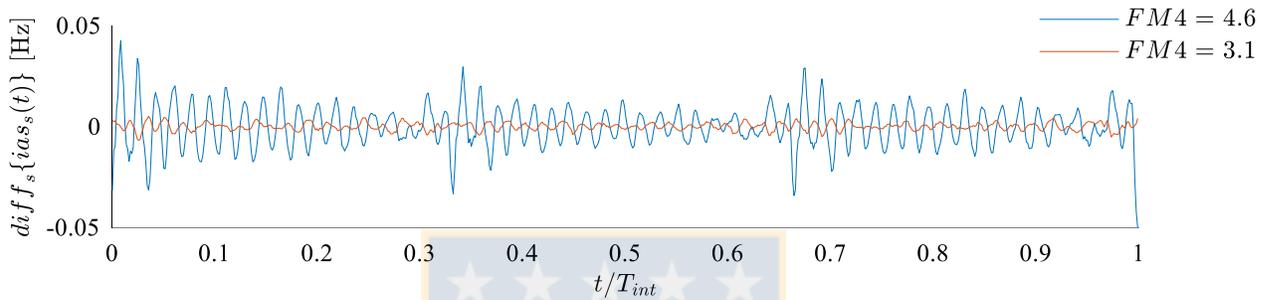
Morales (2017) presenta el estudio de la velocidad angular instantánea del sol determinada a partir de un encoder óptico acoplado al extremo libre del motor y a partir de un sensor magnético apuntando a una rueda dentada acoplada al eje del sol. En dicho trabajo se observa que las componentes espectrales asociadas al proceso de engrane en la transmisión planetaria tienen menor amplitud en la velocidad angular determinada utilizando el encoder óptico en comparación a la velocidad angular determinada utilizando el sensor magnético. Este comportamiento se atribuye a que el acoplamiento elastomérico utilizado en la transmisión aísla el encoder óptico de las vibraciones torsionales generadas en el proceso de engrane. En el presente trabajo, se reemplaza el sensor magnético y la rueda dentada, de resolución $72 [muestras/rev_s]$, por un encoder pasante, con una resolución de $5000 [muestras/rev_s]$. Este aumento en la resolución ofrece una frecuencia máxima en el espectro mayor, lo que permite identificar zonas resonantes a alta frecuencia y realizar un diagnóstico incipiente.

La Figura 5.1(a) muestra el espectro de la velocidad angular instantánea $IAS_s(f)$ determinada a partir del tiempo entre pulsos de cada encoder (lado planetario y lado motor) para la condición de daño en el sol. De igual forma a lo presentado en (Morales, 2017), se observa que las componentes espectrales asociadas al comportamiento dinámico de la transmisión tienen menor amplitud en la velocidad angular instantánea determinada a partir del encoder lado motor. La Figura 5.1(b) muestra la señal diferencia de la velocidad angular instantánea $diff_s\{ias_s(t)\}$ determinada a partir del tiempo entre pulsos de cada encoder; además, se presenta el $FM4$ de ambas señales. Se observa que sólo la IAS determinada a partir del encoder lado planetario presenta evidencia del daño en la forma de onda, lo que además se manifiesta como un $FM4$ mayor que la IAS determinada a partir del encoder lado motor.

La Tabla 5.1 muestra el $FM4$ de la velocidad angular instantánea del sol para las tres condiciones de daño ensayadas. Además, se presenta la variación porcentual del $FM4$ con respecto a la condición sin daño. En la mayoría de los casos, se observa un $FM4$ mayor para el encoder lado planetario, además de una variación negativa en el $FM4$ del encoder lado motor, asociado al carácter aleatorio de la señal, lo cual indica que no se pudo identificar el daño. Esto confirma que la capacidad de diagnóstico de fallas del encoder lado planetario es mayor, por lo que se decide continuar el estudio utilizando sólo este último encoder.



(a) Espectro de la velocidad angular instantánea



(b) Señal diferencia de la velocidad angular instantánea

Figura 5.1. Espectro y señal diferencia de la velocidad angular instantánea, encoder lado planetario y lado motor, daño en el sol, $f_s = 1000$ CPM, $T_l = 32,4$ Nm.

Tabla 5.1. $FM4$ de la velocidad angular instantánea, encoder lado planetario y lado motor⁹.

	1500.1	1500.2	1500.3	1000.1	1000.2	1000.3	500.1	500.2	500.3
Lado Motor	2,9 -38%	3,1 -17%	3,2 -9%	3,0 -53%	3,0 -34%	3,1 -35%	3,5 -11%	3,5 -27%	3,9 8%
Lado Planetario	6,1 103%	5,5 79%	5,8 96%	11,7 307%	6,9 115%	4,6 50%	12,7 384%	12,9 331%	12,7 365%

(a) Daño en el sol

Lado Motor	2,3 -16%	2,6 -1%	2,6 -12%	2,7 -7%	3,0 9%	2,9 0%	2,7 19%	2,7 13%	2,9 0%
Lado Planetario	2,6 -13%	2,5 -13%	2,9 -3%	3,9 21%	5,0 72%	5,1 87%	2,9 10%	2,9 7%	3,4 11%

(b) Daño en un planeta

Lado Motor	3,0 -17%	2,9 0%	3,2 38%	3,3 -41%	3,1 -22%	3,2 -40%	3,3 -54%	2,1 -29%	3,0 -31%
Lado Planetario	2,8 -11%	2,9 -5%	3,1 -1%	3,3 21%	3,6 19%	4,2 32%	3,1 3%	2,0 -17%	2,9 5%

(c) Daño en el anillo

⁹ La escala de colores se define interpolando entre el valor mínimo y el valor máximo de la tabla.



5.2. Aceleración angular instantánea

Una alternativa al uso de la velocidad angular instantánea para extraer indicadores de la condición mecánica de la transmisión es el uso de la aceleración angular instantánea. Debido al proceso de diferenciación de la velocidad angular instantánea, la amplitud de las componentes a alta frecuencia aumenta en relación a la amplitud de las componentes a menor frecuencia. Esto presenta una ventaja en el diagnóstico de fallas ya que se atenúan las componentes a baja frecuencia, asociadas al comportamiento dinámico del motor eléctrico, y se resaltan los armónicos de mayor orden de la frecuencia de engrane y sus bandas laterales asociadas a impactos; de esta forma, es posible extraer indicadores de la condición mecánica abarcando una mayor cantidad de frecuencias naturales de la transmisión.

La Figura 5.2(a) muestra el espectro de la velocidad y de la aceleración angular instantánea del sol, $IAS_s(f)$ e $IAA_s(f)$ respectivamente, para la condición de daño en el sol. Se observa que la amplitud de los armónicos de la frecuencia de engrane disminuye de forma más notoria para la velocidad angular instantánea sol. La Figura 5.2(b) muestra la señal diferencia de la velocidad y de la aceleración angular instantánea del sol, $diff_s\{ias_s(t)\}$ y $diff_s\{iaa_s(t)\}$ respectivamente. Se observa que la aceleración angular instantánea presenta un $FM4$ mayor, lo que evidencia de mejor forma el daño.

La Tabla 5.2 muestra el $FM4$ de la velocidad y aceleración angular instantánea del sol para las tres condiciones de daño ensayadas. Además, se presenta la variación porcentual del $FM4$ con respecto a la condición sin daño. Se observa que en más de la mitad de los casos la aceleración angular instantánea presenta un $FM4$ y una variación porcentual mayor, por lo que se decide continuar el estudio utilizando sólo la aceleración angular instantánea.

5.3. Multiplicidad de planetas

De acuerdo a lo presentado en la sección 4.2, el primer paso en la construcción de la señal diferencia es obtener el promedio sincrónico del componente de interés; de esta forma, el espectro de la señal resultante sólo contiene armónicos de la frecuencia de interés $f_c^{Z_r/Z_{int}} = 1/t_{int}$. Sin embargo, de acuerdo a lo expuesto en la sección 2.2, para las condiciones de daño en el sol y daño en el anillo, el espectro de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol contiene armónicos de $Nf_c^{Z_r/Z_{int}} = N/t_{int}$, producto del engrane del diente dañado con los N planetas. Según esto, lo correcto es calcular el promedio sincrónico de la N -ésima parte del periodo interés, ya que se aplica un filtro más selectivo y se aísla de mejor forma la perturbación asociada al daño.

La Figura 5.3(a) muestra el espectro de la aceleración transversal para la condición de daño en el anillo, donde se observan bandas laterales a lf_c en torno a la componente $3f_g$, producto del engrane del diente dañado y de la modulación producto del paso de planetas. La Figura 5.3(b) muestra la señal diferencia de la aceleración transversal para la condición de daño en el anillo, considerando $f_{int} = f_c$ y $f_{int} = Nf_c$. Se observa que la señal diferencia obtenida utilizando el promedio sincrónico de un tercio de revolución evidencia de mejor forma el daño en el anillo, lo que se manifiesta además en un $FM4$ mayor.

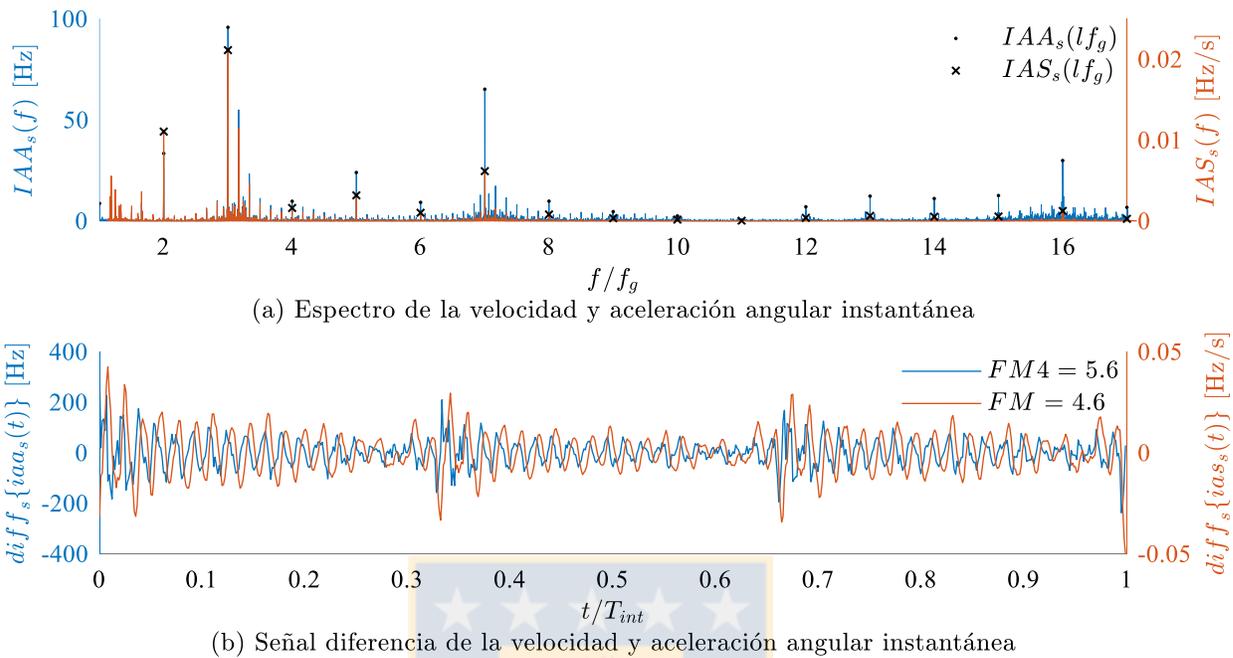


Figura 5.2. Espectro y señal diferencia de la velocidad y de la aceleración angular instantánea del sol, daño en el sol, $f_s = 1000$ CPM, $T_l = 32,4$ Nm.

Tabla 5.2. *FM4* de la velocidad y aceleración angular instantánea del sol.

	1500.1	1500.2	1500.3	1000.1	1000.2	1000.3	500.1	500.2	500.3
$iaa_s(t)$	9,3 136%	10,0 132%	7,9 93%	11,0 206%	7,1 95%	5,6 41%	11,6 301%	11,6 265%	11,9 234%
$ias_s(t)$	6,1 103%	5,5 79%	5,8 96%	11,7 307%	6,9 115%	4,6 50%	12,7 384%	12,9 331%	12,7 365%

(a) Daño en el sol

$iaa_s(t)$	4,4 61%	2,9 0%	3,3 5%	4,9 40%	4,9 58%	5,8 90%	3,7 31%	3,2 11%	3,8 31%
$ias_s(t)$	2,6 -13%	2,5 -13%	2,9 -3%	3,9 21%	5,0 72%	5,1 87%	2,9 10%	2,9 7%	3,4 11%

(b) Daño en un planeta

$iaa_s(t)$	2,9 -7%	3,0 1%	3,0 -13%	3,4 33%	3,5 35%	3,9 32%	3,2 -6%	3,3 -21%	3,3 -20%
$ias_s(t)$	2,8 -11%	2,9 -5%	3,1 -1%	3,3 21%	3,6 19%	4,2 32%	3,1 3%	2,0 -17%	2,9 5%

(c) Daño en el anillo

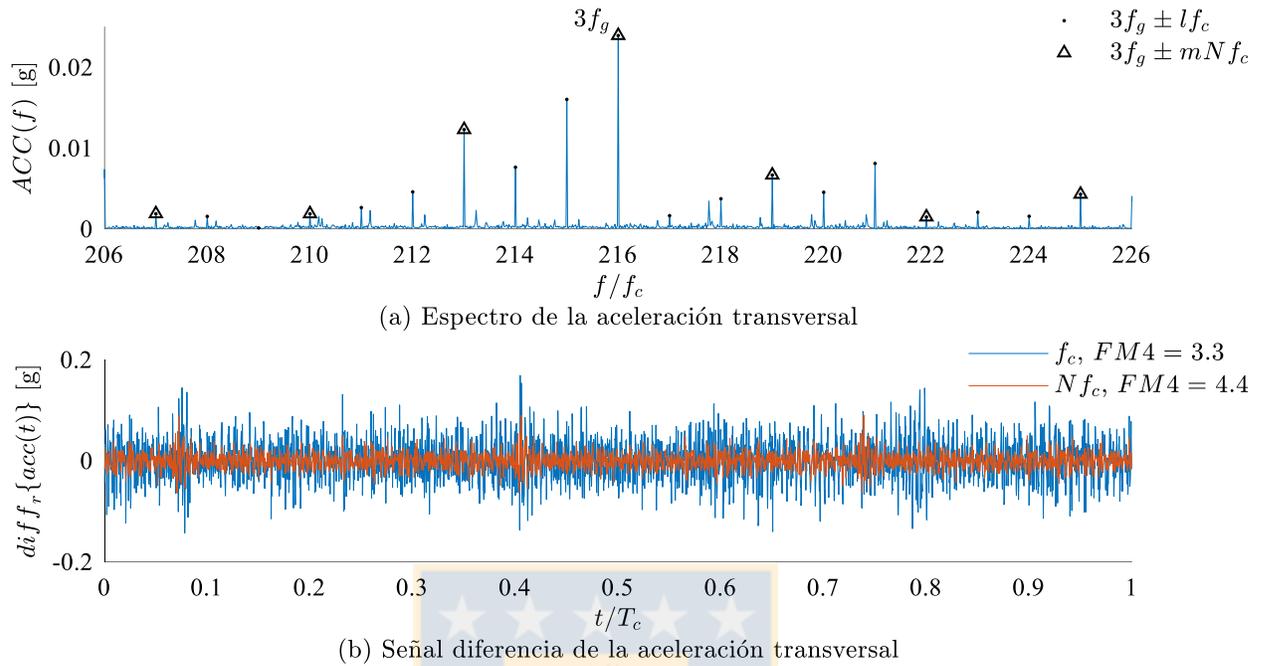


Figura 5.3. Espectro y señal diferencia de la velocidad de la aceleración transversal, daño en el anillo¹⁰, $f_s = 1000$ CPM, $T_l = 10,8$ Nm.

La Tabla 5.3 muestra el $FM4$ de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol para la condición de daño en el anillo. Además, se presenta la variación porcentual del $FM4$ con respecto a la condición sin daño. En general, se observa que para gran parte de los casos estudiados el hecho de considerar un tercio del periodo de interés realza la evidencia del daño. De acuerdo a esto, para la condición de daño en el anillo se decide considerar el promedio sincrónico de un tercio de ciclo de la frecuencia de interés.

La Tabla 5.4 muestra el $FM4$ de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol para la condición de daño en el sol. Además, se presenta la variación porcentual del $FM4$ con respecto a la condición sin daño. De forma contraria a lo presentado para la condición de daño en el anillo, se observa que el hecho de considerar el promedio sincrónico de un tercio del periodo de interés atenúa la evidencia del daño. Esto se debe probablemente a que las bandas laterales a f_{int} también contienen información sobre la perturbación asociada al engrane del diente dañado. De acuerdo a esto, para la condición de daño en el sol se decide considerar el promedio sincrónico de un ciclo completo de la frecuencia de interés.

¹⁰ La señal diferencia de un tercio de revolución se ha repetido tres veces con el objetivo de poder compararla con la señal diferencia de una revolución completa.

Tabla 5.3. *FM4* de la aceleración transversal y aceleración angular instantánea, daño en el anillo.

	1500.1	1500.2	1500.3	1000.1	1000.2	1000.3	500.1	500.2	500.3
f_c	3,8 -11%	3,6 -22%	3,0 -23%	3,3 6%	3,3 -8%	3,5 -7%	3,8 -11%	4,0 -20%	4,0 -20%
Nf_c	3,5 8%	3,7 2%	3,5 -12%	4,4 31%	4,1 3%	4,2 -7%	4,5 -10%	4,4 -24%	4,4 -10%

(a) Aceleración transversal

f_c	2,9 -7%	3,0 1%	3,0 -13%	3,4 33%	3,5 35%	3,9 32%	3,2 -6%	3,3 -21%	3,3 -20%
Nf_c	4,8 42%	4,0 24%	4,1 41%	3,5 15%	5,1 52%	6,9 106%	3,2 4%	3,8 14%	4,1 15%

(b) Aceleración angular instantánea

Tabla 5.4. *FM4* de la aceleración transversal y aceleración angular instantánea, daño en el sol.

	1500.1	1500.2	1500.3	1000.1	1000.2	1000.3	500.1	500.2	500.3
$f_s - f_c$	15,7 328%	16,0 356%	16,0 385%	30,0 902%	17,0 397%	16,7 345%	17,8 440%	17,1 359%	25,6 594%
$N(f_s - f_c)$	8,7 148%	5,1 44%	7,8 184%	12,3 231%	11,7 215%	7,5 103%	10,1 135%	11,0 186%	7,8 68%

(a) Aceleración transversal

$f_s - f_c$	9,3 136%	10,0 132%	7,9 93%	11,0 206%	7,1 95%	5,6 41%	11,6 301%	11,6 265%	11,9 234%
$N(f_s - f_c)$	4,7 56%	5,6 100%	4,3 65%	5,0 65%	4,3 44%	4,6 55%	6,0 119%	5,5 97%	6,0 97%

(b) Aceleración angular instantánea

La metodología presentada para definir el periodo del promedio sincrónico difícilmente puede ser aplicada en la industria, ya que requiere contar con componentes dañados y con la oportunidad de realizar diferentes ensayos. Por esto, para la aplicación práctica del análisis de la señal diferencia, se recomienda tomar por separado el promedio sincrónico de una revolución y el promedio sincrónico de la N -ésima parte de una revolución. De esta forma, se tienen dos señales diferentes y dos indicadores para cada condición de daño.

CAPÍTULO 6

Análisis de resultados: ensayos bajo condiciones de operación constante

En este capítulo se presenta el análisis del espectro y de la señal diferencia de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol. Con el objetivo de destacar el contenido espectral de cada señal y compararlo con la predicción de los modelos de vibración en transmisiones planetarias (Tablas 2.1 y 2.2), para cada condición mecánica se presenta el detalle del espectro en torno al tercer armónico de la frecuencia de engrane f_g bajo la condición de operación 1000.2. Además, para cada condición de daño se presenta la señal diferencia del componente dañado y una tabla resumen con el *FM4* para todas las condiciones de operación ensayadas.

6.1. Transmisión sin daño

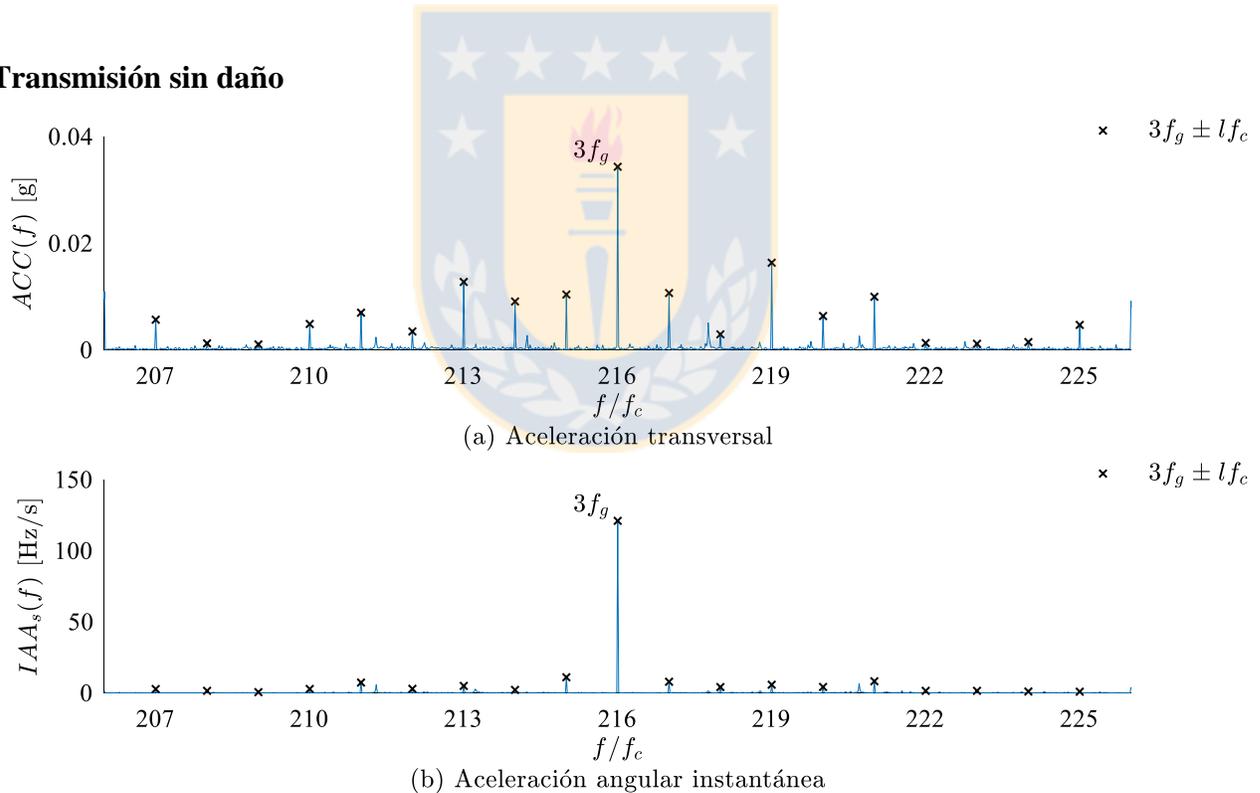


Figura 6.1. Espectro, transmisión sin daño, $f_s = 1000$ CPM, $T_l = 16,2$ Nm

La Figura 6.1(a) muestra el espectro de la aceleración transversal para la transmisión sin daño. A pesar de que los modelos de vibración en transmisiones planetarias predicen la existencia de bandas laterales

a Nf_c en torno a $3f_g$, se observan bandas laterales a f_c . Esto probablemente se debe a una asimetría angular de los planetas con respecto al centro de rotación del carrier, lo que lleva a una supresión parcial de las bandas laterales a f_c , de acuerdo a lo descrito en 2.2.1.

La Figura 6.1(b) muestra el espectro de la aceleración angular instantánea del sol. Al contrario de la predicción de los modelos de vibración en transmisiones planetarias, sí se observan bandas laterales a lf_c , pero de menor amplitud relativa¹¹ a $3f_g$. En comparación al espectro de la aceleración transversal (Figura 6.1(a)). De manera análoga al caso de la aceleración transversal, esto se debe probablemente a una asimetría angular de los planetas con respecto al centro de rotación del carrier, lo que modula la aceleración angular instantánea del sol a f_c , de acuerdo a lo descrito en 2.2.2. Además, se observan bandas laterales a la frecuencia de rotación del sol $f_s = r_t f_c = 5f_c$, asociadas a la excentricidad del encoder óptico utilizado. A pesar de que esta última familia de bandas laterales modula todo el espectro de la aceleración angular instantánea del sol, la capacidad de diagnóstico no se ve afectada ya que las componentes de interés no son múltiplos de la frecuencia de rotación del sol.

6.2. Daño en el sol

La Figura 6.2(a) muestra el espectro de la aceleración transversal, donde, de acuerdo a lo expuesto en la Tabla 2.1, se observan bandas laterales a $N(f_s - f_c)$ y a f_s . De forma adicional, se observan bandas laterales a f_c debido probablemente a una asimetría angular de los planetas con respecto al centro de rotación del carrier. La Figura 6.2(b) muestra el espectro de la aceleración angular instantánea del sol, donde se observan todas las componentes descritas en la Tabla 2.2. Además, al contrario de la predicción de los modelos de vibración en transmisiones planetarias, sí se observan bandas laterales a f_c pero de menor amplitud relativa a $3f_g$. La Figura 6.3 muestra la señal diferencia de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol, donde se observa la perturbación asociada al engrane del diente dañado en el sol con los tres planetas¹².

La Tabla 6.1 muestra el *FM4* para las diferentes condiciones de operación ensayadas, donde se observa que en todos los casos es posible advertir el daño en el sol. En todos los casos, para ambas señales es posible advertir el daño en el sol. Además, tanto el *FM4* como su variación porcentual con respecto a la condición sin daño son mayores para la aceleración transversal que para la aceleración angular instantánea del sol, por lo que es correcto afirmar que se logra advertir de mejor forma el daño a través de la aceleración transversal. Cabe destacar que no se tiene una tendencia al variar la condición de operación.

De esta forma, se concluye que un daño local en un diente del sol produce variaciones en la aceleración transversal y en la aceleración angular instantánea del sol que pueden ser detectadas a través del análisis espectral y el análisis de la señal diferencia de estas señales; además, se confirma que, para la condición de daño en el sol, la aceleración angular instantánea del sol presenta una menor cantidad de familias de

¹¹ En comparación al espectro de la aceleración transversal (Figura 6.1(a)).

¹² Como para la condición de daño en el sol se tiene que $f_{int} = N(f_s - f_c) = 3(5f_c - f_c) = 12f_c$, por cada revolución del carrier se observan doce perturbaciones.

Tabla 6.1. *FM4*, daño en el sol.

	1500.1	1500.2	1500.3	1000.1	1000.2	1000.3	500.1	500.2	500.3
$acc(t)$	15,7 328%	16,0 356%	16,0 385%	30,0 902%	17,0 397%	16,7 345%	17,8 440%	17,1 359%	25,6 594%
$iaa_s(t)$	9,3 136%	10,0 132%	7,9 93%	11,0 206%	7,1 95%	5,6 41%	11,6 301%	11,6 265%	11,9 234%

bandas laterales que la aceleración transversal, facilitando el diagnóstico de este tipo de daño, lo que concuerda con lo expuesto en (Morales, 2017).

6.3. Daño en un planeta

La Figura 6.4 muestra el espectro de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol para la condición de daño en un planeta, donde se observan todas las componentes descritas en las Tablas 2.1 y 2.2 respectivamente. Además, de manera análoga al caso de la transmisión sin daño y al contrario de la predicción de los modelos de vibración en transmisiones planetarias, en el espectro de la aceleración angular instantánea del sol sí se observan bandas laterales a f_c pero de menor amplitud relativa a $3f_g$. La baja amplitud de las componentes espectrales asociadas al daño en el planeta se debe a que el nivel de daño inducido es menor al nivel de daño en sol. A pesar de esto, tanto para la aceleración transversal como para la aceleración angular instantánea del sol, al analizar la señal diferencia se observan perturbaciones a la frecuencia de falla, asociadas al engrane del flanco dañado con el sol (Figura 6.5).

La Tabla 6.2 muestra el *FM4* para las diferentes condiciones de operación ensayadas. Se observa que en gran parte de los casos es posible advertir el daño en el planeta a través de una variación porcentual del *FM4* mayor al 10%. En general, no es posible afirmar que con alguna de las dos señales se advierta de mejor forma el daño en el planeta. De forma análoga a la condición de daño en el anillo, se observa además que no existe una tendencia al variar la condición de operación.

De esta forma, se concluye que un daño local en el diente de un planeta produce variaciones en la aceleración transversal y en la aceleración angular instantánea del sol que pueden ser detectadas en el análisis espectral y el análisis de la señal diferencia de estas señales.

Tabla 6.2. *FM4*, daño en un planeta.

	1500.1	1500.2	1500.3	1000.1	1000.2	1000.3	500.1	500.2	500.3
$acc(t)$	4,2 46%	4,0 26%	3,9 32%	6,6 100%	4,1 33%	3,5 21%	3,6 19%	3,2 4%	3,4 6%
$iaa_s(t)$	4,4 61%	2,9 0%	3,3 5%	4,9 40%	4,9 58%	5,8 90%	3,7 31%	3,2 11%	3,8 31%

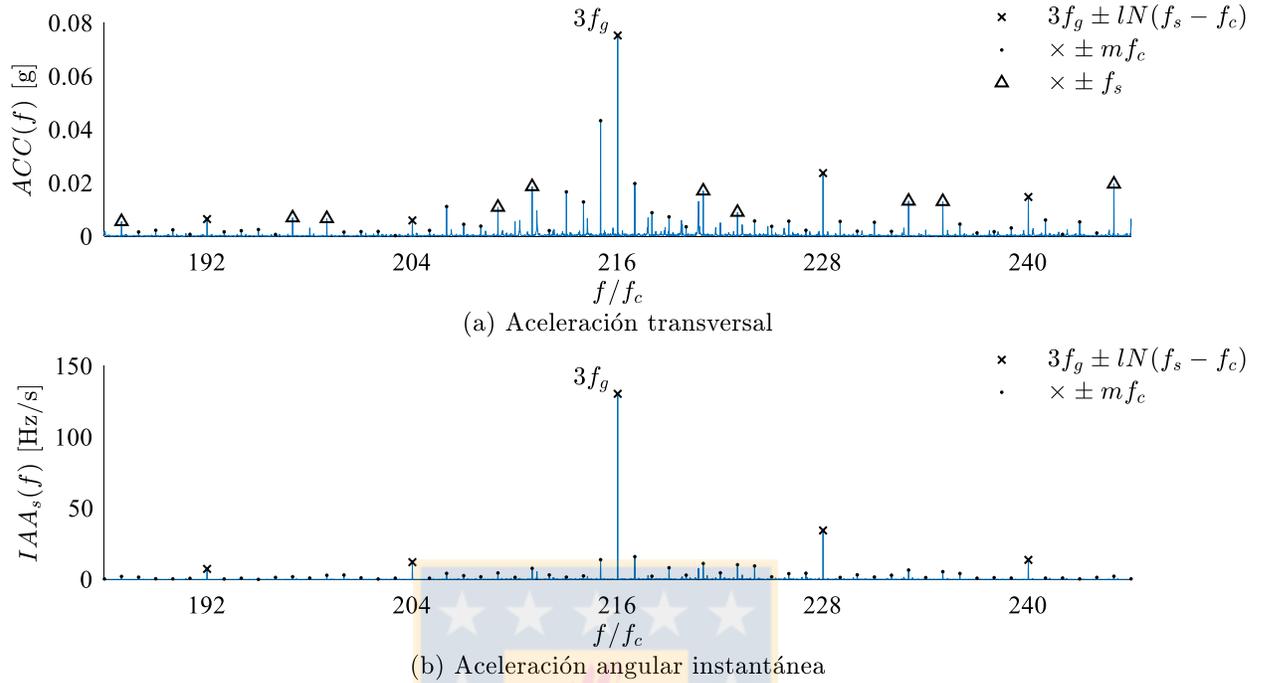


Figura 6.2. Espectro, daño en el sol, $f_s = 1000$ CPM, $T_l = 16,2$ Nm.

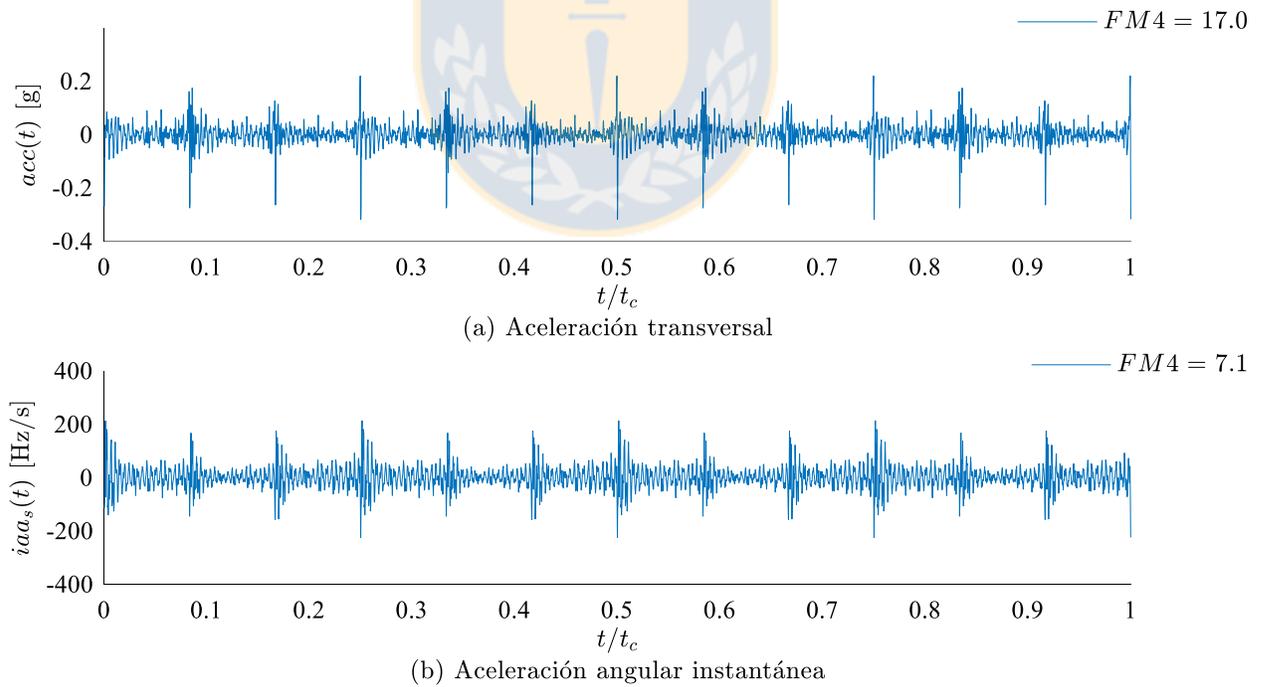


Figura 6.3. Señal diferencia, daño en el sol, $f_s = 1000$ CPM, $T_l = 16,2$ Nm.

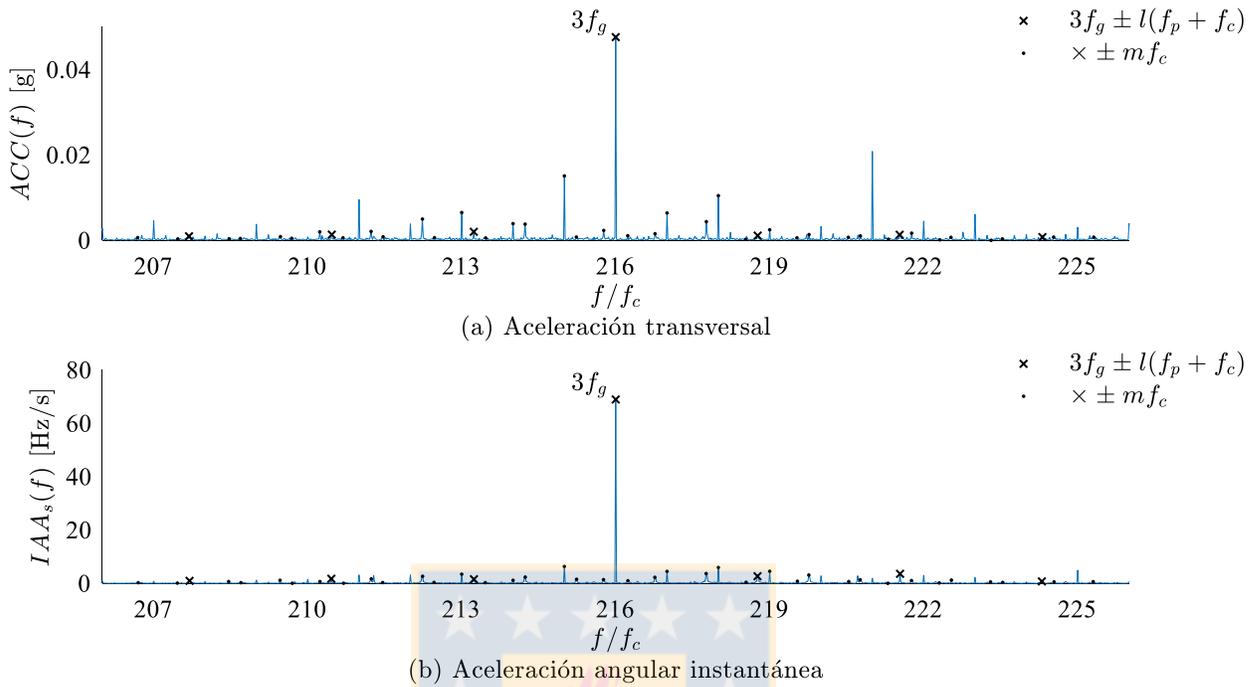


Figura 6.4. Espectro, daño en un planeta, $f_s = 1000$ CPM, $T_l = 16,2$ Nm

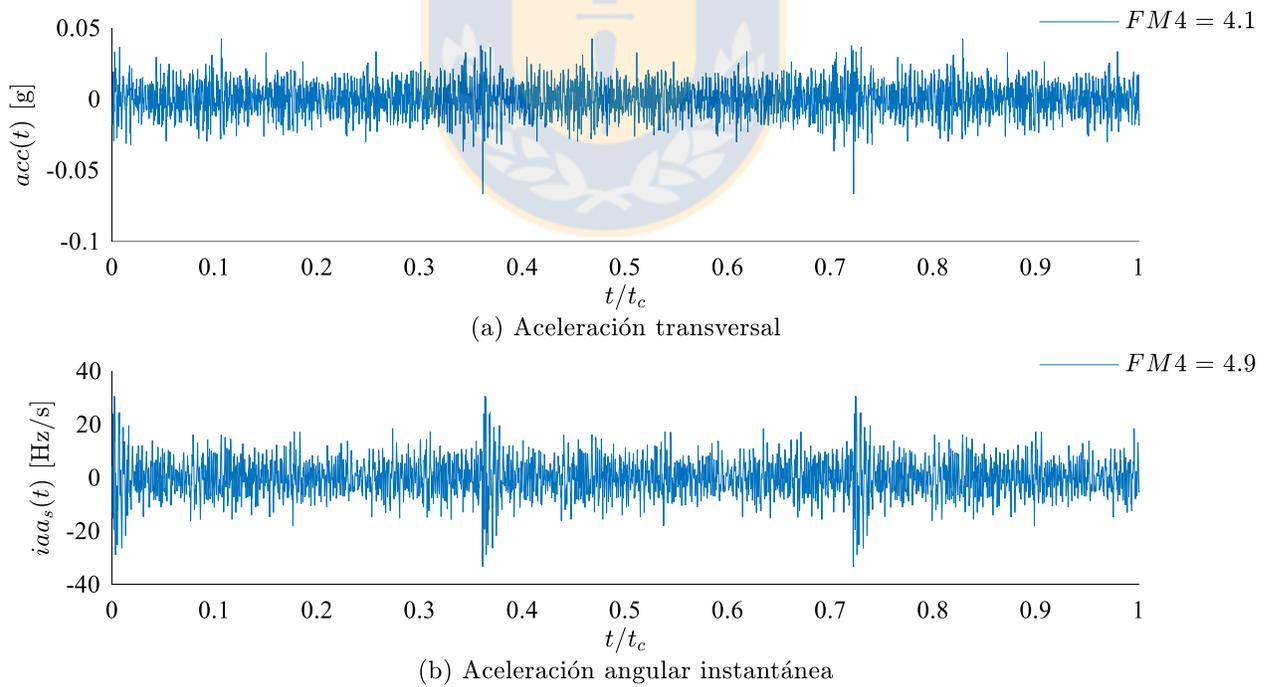


Figura 6.5. Señal diferencia, daño en un planeta, $f_s = 1000$ CPM, $T_l = 16,2$ Nm.

6.4. Daño en el anillo

La Figura 6.6 muestra el espectro de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol, donde se observa un aumento en la amplitud relativa a $3f_g$ de las componentes a f_c con respecto a la transmisión sin daño (Figura 6.1). Este tipo de daño es complejo de diagnosticar a través del análisis espectral de la aceleración transversal, ya que para la condición de transmisión sin daño ya se observan modulaciones a f_c asociadas al paso de planetas. Por otro lado, la aceleración angular instantánea del sol para la transmisión sin daño también presenta modulaciones a f_c , pero estas son de menor amplitud, por lo que teóricamente es más simple diagnosticar este tipo de daño a través del análisis espectral de esta última señal. De forma análoga a la condición de daño en el sol, la baja amplitud de las componentes espectrales asociadas al daño en el anillo se debe a que el nivel de daño inducido es menor al nivel de daño en sol. Al analizar la señal diferencia de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol se observa la perturbación asociada al engrane del diente dañado en el anillo con los tres planetas (Figura 6.7).

La Tabla 6.3 muestra el $FM4$ para las diferentes condiciones de operación ensayadas. A pesar de que en la señal diferencia de la aceleración transversal es posible distinguir la perturbación asociada al daño (Figura 6.7(a)), se tiene una variación porcentual negativa en el $FM4$. Esto indica que no es posible advertir el daño en el anillo utilizando el $FM4$. Por otra parte, para aceleración angular instantánea del sol sólo es posible advertir correctamente el daño en el anillo para las condiciones de operación para $f_s = 1000$ CPM. Esto se debe a que para $f_s = 1000$ CPM, el tercer y el séptimo armónico de la frecuencia de engrane se encuentran en las zonas resonantes descritas en la Figura 4.2¹³, lo que se traduce en que las componentes espectrales asociadas al daño tengan una amplitud predominante en comparación a las otras condiciones de operación. El fenómeno descrito no se observa en la aceleración transversal, debido probablemente a que las zonas resonantes son tan claras como para la aceleración angular instantánea.

De esta forma, se concluye que un daño local en el anillo produce variaciones en la aceleración transversal y en la aceleración angular instantánea del sol que pueden ser detectadas a través del análisis espectral y del análisis de la señal diferencia de estas señales. Además, se concluye que estas variaciones son identificadas de forma más fácil a través del análisis espectral de la aceleración angular instantánea del sol.

Tabla 6.3. $FM4$, daño en el anillo.

	1500.1	1500.2	1500.3	1000.1	1000.2	1000.3	500.1	500.2	500.3
$acc(t)$	3,5 -11%	3,7 -22%	3,5 -23%	4,4 6%	4,1 -8%	4,2 -7%	4,5 -11%	4,4 -20%	4,4 -20%
$iaa_s(t)$	4,8 -7%	4,0 1%	4,1 -13%	3,5 33%	5,1 35%	6,9 32%	3,2 -6%	3,8 -21%	4,1 -20%

¹³ Para $f_s = 500$ CPM se tiene $f_g = Z_r f_c = Z_r f_s / r_t = 240$ Hz, por lo que se tiene que $3f_g = 720$ Hz y $7f_g = 1680$ Hz.

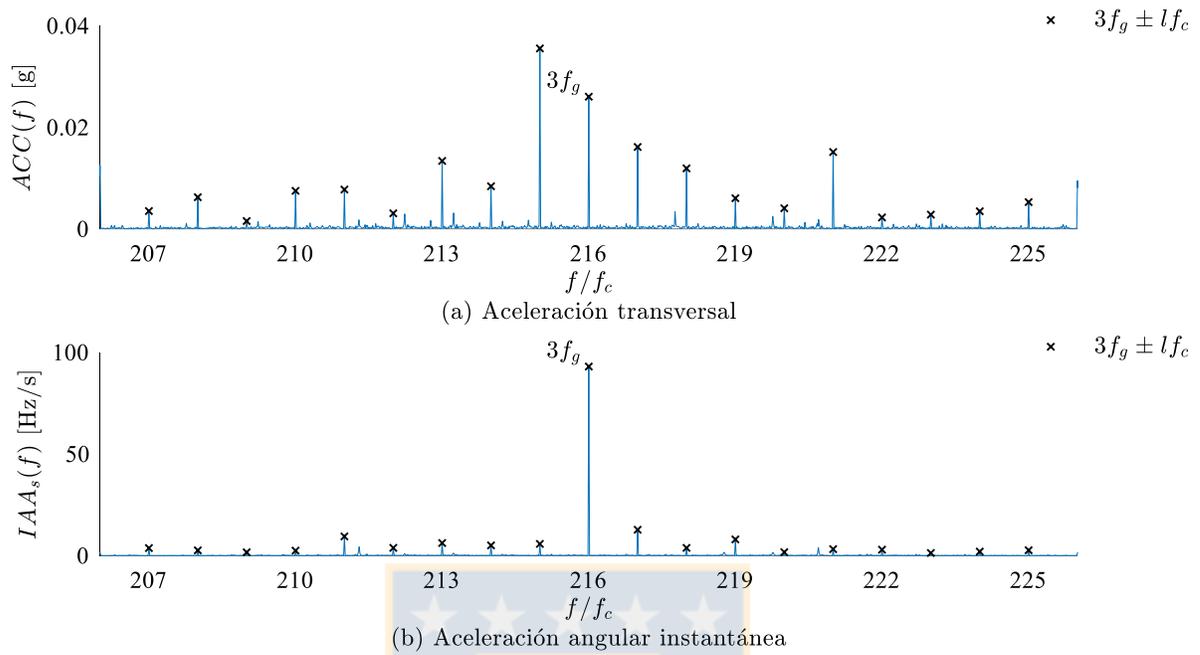


Figura 6.6. Espectro, daño en el anillo, $f_s = 1000$ CPM, $T_l = 16,2$ Nm

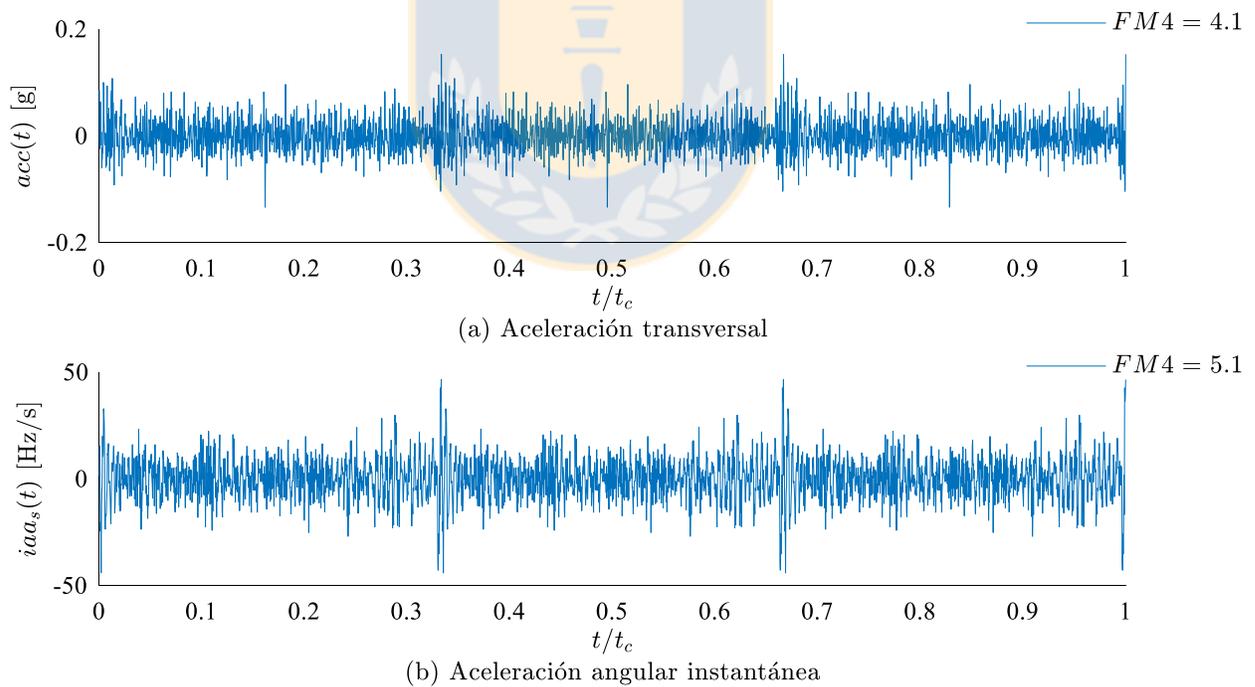


Figura 6.7. Señal diferencia, daño en el anillo, $f_s = 1000$ CPM, $T_l = 16,2$ Nm.

CAPÍTULO 7

Análisis de resultados: ensayos bajo condiciones de operación variable

En este capítulo se presenta el análisis del espectro y de la señal diferencia de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol. Con el objetivo de destacar el contenido espectral de cada señal para cada condición mecánica se presenta el detalle del espectro en torno al tercer armónico de la frecuencia de engrane f_g bajo la condición de operación 500.B. Además, para cada condición de daño se presenta la señal diferencia del componente dañado y una tabla resumen con el *FM4* para todas las condiciones de operación ensayadas.

7.1. Transmisión sin daño

La Figura 7.1 muestra el torque resistente aplicado $T_l(t)$ y el inverso de la velocidad de rotación media del sol¹⁴ $ias_s^{-1}(t)$ para la condición de operación 500.B. Se observa que la relación entre el torque resistente y el periodo de rotación es prácticamente lineal, por lo que es correcto afirmar que las variaciones en la velocidad de rotación media son producto de las variaciones en el torque resistente. Se observan variaciones de $\pm 10,1\%$ en torno a la velocidad de rotación media de, lo que representa una variación total de 20,2%. Desde el punto de vista del diagnóstico de fallas, esta es la condición más desfavorable entre las diferentes condiciones de operación estudiadas, ya que presenta una mayor dispersión de las componentes en el espectro asociada a las variaciones de velocidad de rotación media.

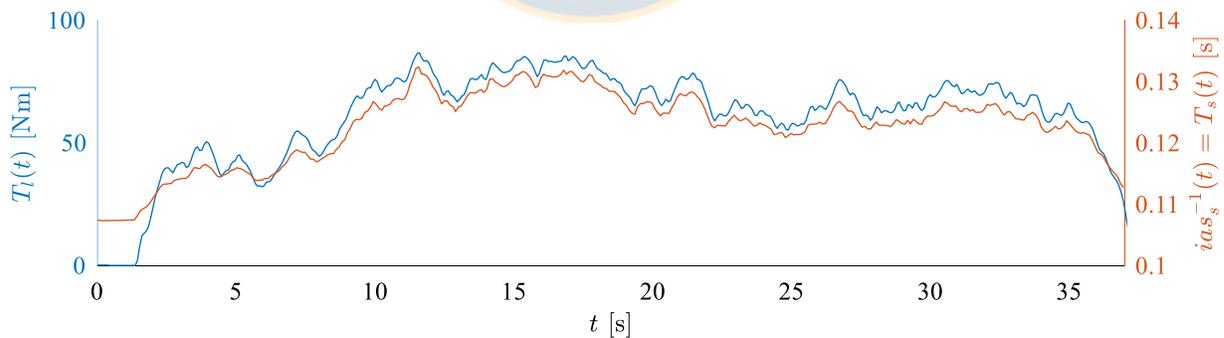


Figura 7.1. Relación entre el torque resistente y la velocidad de rotación, transmisión sin daño, $f_s = 500$ CPM, $T_l = T_{l,B}(t)$.

¹⁴ Es decir, el período de rotación del sol $T_s(t)$.

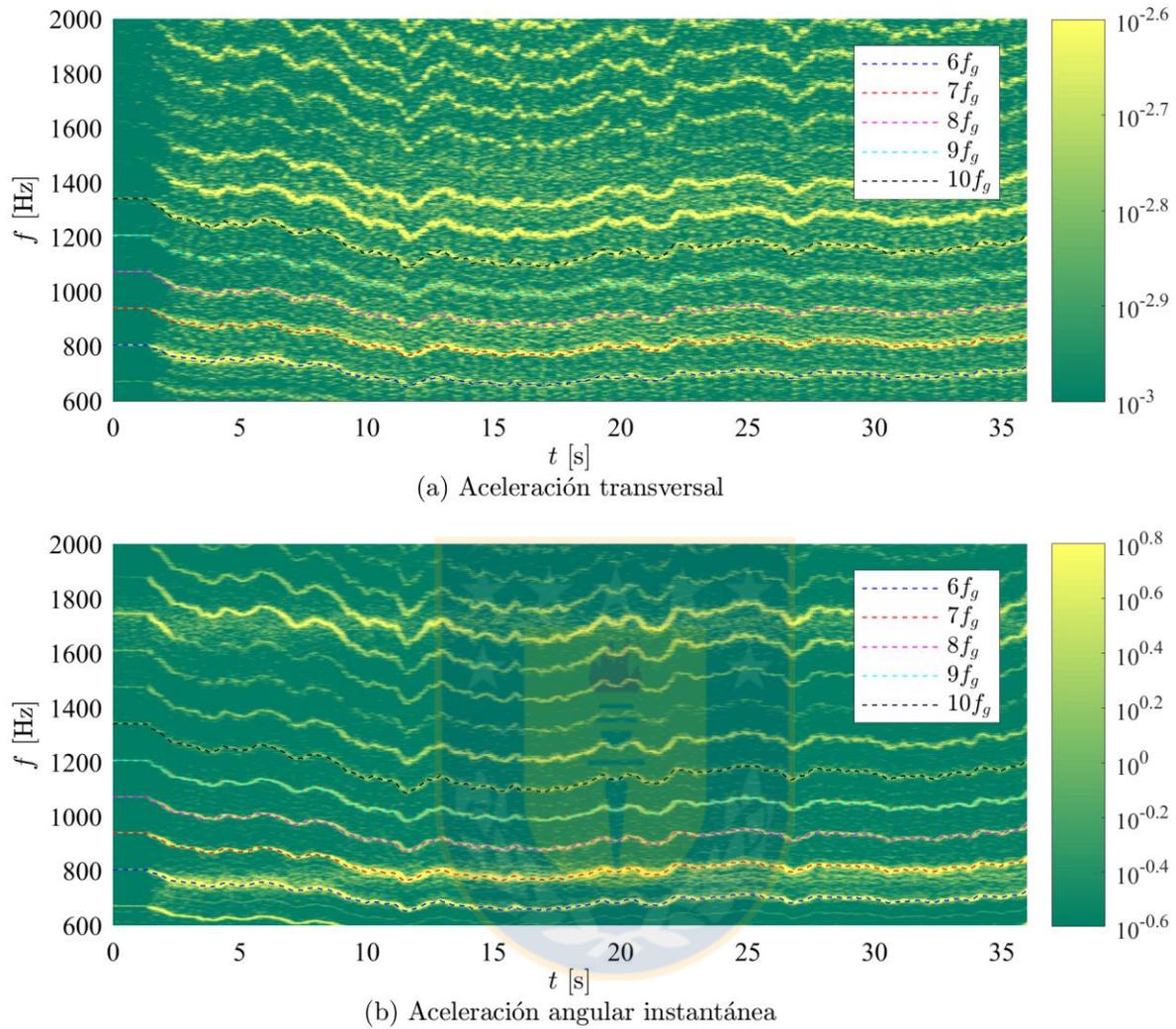


Figura 7.2. Representación en tiempo-frecuencia, transmisión sin daño, $f_s = 500$ CPM, $T_l = T_{l,B}(t)$.

Las Figuras 7.2(a) y 7.2(b) muestran la representación en tiempo-frecuencia de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol respectivamente, donde se han destacado los armónicos de la frecuencia de engrane. Se observa que el espectro de la aceleración angular instantánea del sol presenta los armónicos de la frecuencia de engrane de forma más definida. Además, se observa que la aceleración transversal presenta un mayor ruido en el espectro asociado a la dispersión de bandas laterales en torno a los armónicos de la frecuencia de engrane.

La Figura 7.3 presenta el espectro en *orders* de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol. De forma análoga a los visto en la Figura 7.2, se observa que las componentes espectrales presentan una menor dispersión en el espectro de la aceleración angular instantánea del sol, lo que permite identificar de mejor forma las componentes asociadas a la condición mecánica de la transmisión.

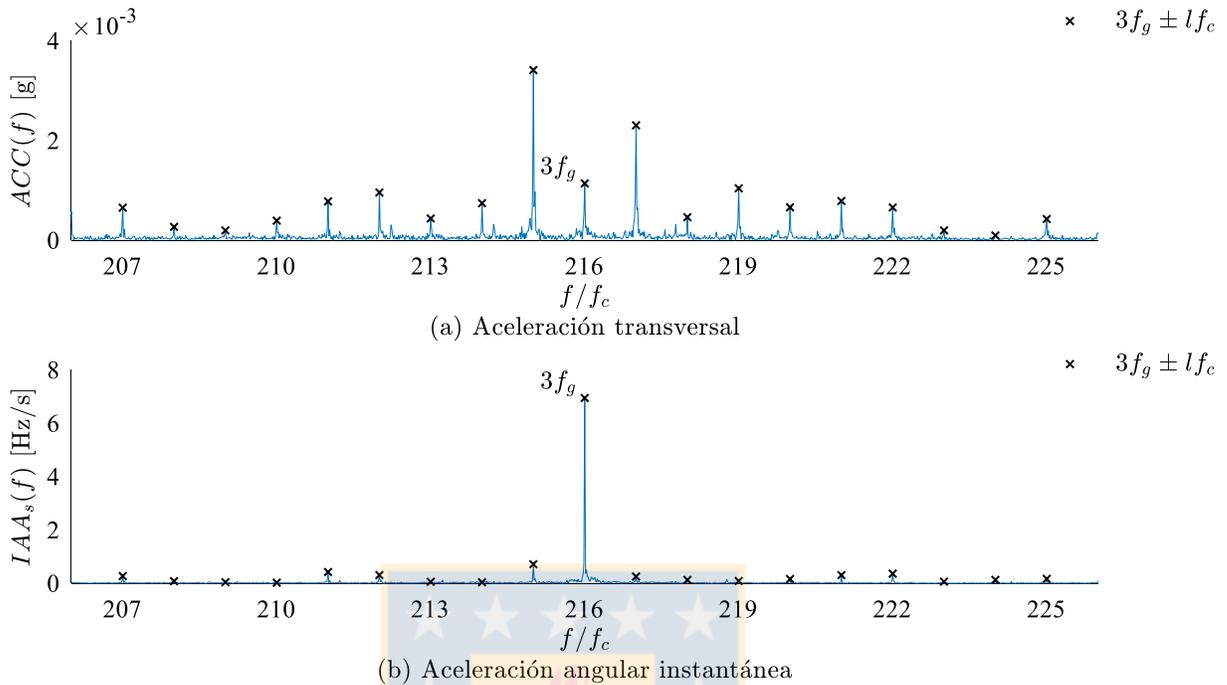


Figura 7.3. Espectro en *orders*, transmisión sin daño, $f_s = 500$ CPM, $T_l = T_{l,B}(t)$.

7.2. Daño en el sol

La Figura 7.4 muestra el espectro de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol para la condición de daño en el sol. Se observan las mismas componentes descritas para los ensayos bajo condiciones de operación constante. De forma análoga a lo descrito para la transmisión sin daño, Figura 7.3, se observa una mayor dispersión en las componentes espectrales de la aceleración transversal. Esto se evidencia en la señal diferencia, Figura 7.5, que presenta un *FM4* menor que la aceleración angular instantánea del sol, de forma contraria a lo visto para los ensayos bajo condiciones de operación constante.

La Tabla 7.1 muestra el *FM4* para las diferentes condiciones de operación ensayadas. Se observa que en todos los casos es posible advertir la presencia del daño en el sol a través de una variación porcentual en el *FM4* elevada. En general, para las condiciones de operación a $f_s = 1500$ y 1000 CPM se observa que los resultados son similares a los vistos para los ensayos bajo condiciones de operación constante, mientras que, para las condiciones de operación a $f_s = 500$ CPM, la aceleración angular instantánea del sol presenta un *FM4* mayor, advirtiendo de mejor forma la presencia del daño.

De esta forma, se concluye que es posible diagnosticar un daño local en el sol en una transmisión bajo condiciones de operación de velocidad de rotación y carga variable, tanto a través del análisis de la aceleración transversal como del análisis de la aceleración angular instantánea del sol.

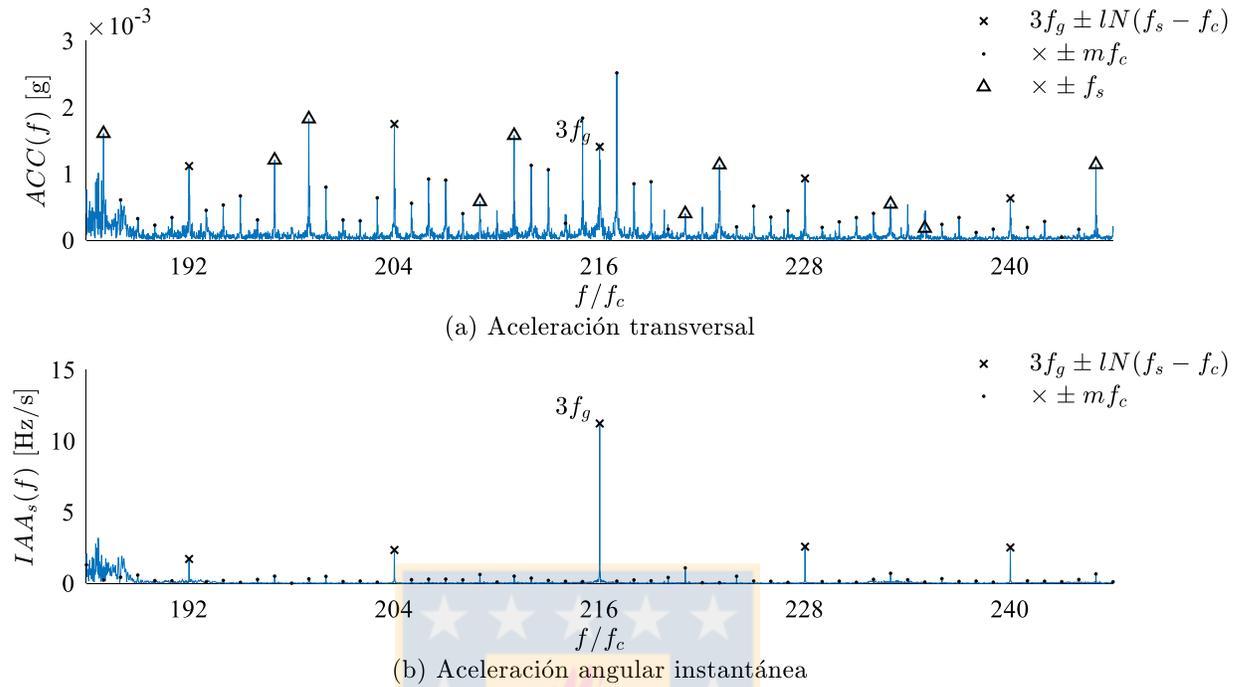


Figura 7.4. Espectro en *orders*, daño en el sol, $f_s = 500$ CPM, $T_l = T_{l,B}(t)$.

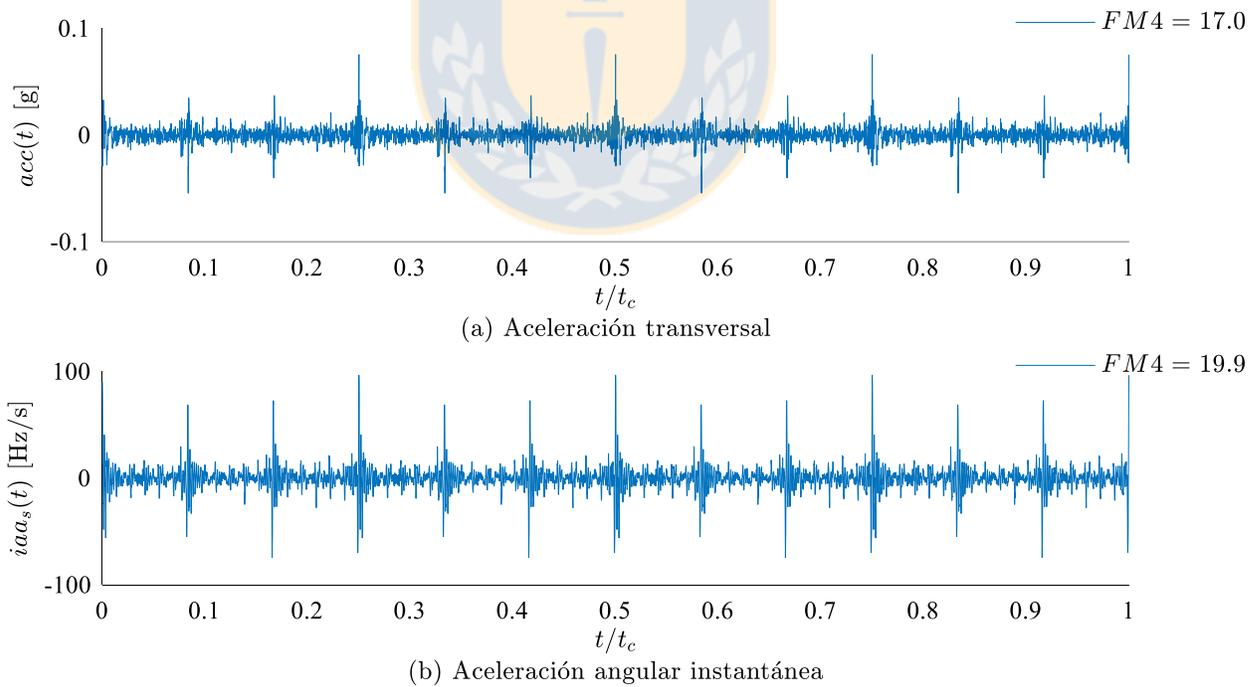


Figura 7.5. Señal diferencia, daño en el sol, $f_s = 500$ CPM, $T_l = T_{l,B}(t)$.

Tabla 7.1. *FM4*, daño en el sol.

	1500.A	1500.B	1500.C	1000.A	1000.B	1000.C	500.A	500.B	500.C
$acc(t)$	13,1 301%	16,1 332%	17,2 373%	15,2 307%	15,1 304%	14,4 292%	9,5 186%	17,0 384%	10,6 189%
$iaa_s(t)$	10,7 251%	8,2 136%	7,9 139%	7,7 109%	7,2 109%	6,5 89%	23,8 532%	19,9 401%	18,7 437%

7.3. Daño en un planeta

La Figura 7.6 muestra el espectro de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol para la condición de daño en un planeta. Se observan las mismas componentes descritas para los ensayos bajo condiciones de operación constante. La Figura 7.7 muestra la señal diferencia de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea. Se observa que sólo es posible identificar la perturbación asociada al engrane del diente dañado en la señal diferencia de la aceleración angular instantánea del sol.

La Tabla 7.2 muestra el *FM4* para las diferentes condiciones de operación ensayadas. Se observa que utilizando la aceleración transversal sólo es posible identificar el daño para $f_s = 1500$ CPM, debido probablemente a que es la condición que presenta menores variaciones de velocidad en torno a la velocidad de rotación media. Por otra parte, utilizando la aceleración angular instantánea del sol es posible advertir el daño para todas las condiciones de operación. De forma análoga a la condición de daño en el anillo bajo condiciones de operación constante, para $f_s = 1000$ CPM, la aceleración angular instantánea del sol presenta un *FM4* mayor para las condiciones de operación de $f_s = 1500$ y 500 CPM, fenómeno asociado a la resonancia del tercer y séptimo armónico de la frecuencia de engrane.

De esta forma, se concluye que utilizando la aceleración angular instantánea del sol es posible diagnosticar un daño incipiente en un planeta en una transmisión operando bajo condiciones de operación de velocidad de rotación y carga variable, mientras que utilizando la aceleración transversal sólo es posible diagnosticarlo bajo condiciones de operación que no presenten variaciones de velocidad mayores. Además, se concluye que las zonas resonantes de la transmisión tienen mayor influencia en la aceleración angular instantánea del sol que en la aceleración transversal, lo que se traduce en que bajo determinadas condiciones se realce la evidencia del daño.

Tabla 7.2. *FM4*, daño en un planeta.

	1500.A	1500.B	1500.C	1000.A	1000.B	1000.C	500.A	500.B	500.C
$acc(t)$	3,6 41%	3,9 40%	3,2 20%	3,3 0%	3,3 0%	3,5 13%	3,5 -3%	3,1 0%	3,2 -3%
$iaa_s(t)$	3,7 24%	3,6 16%	3,5 17%	7,2 133%	6,8 106%	7,4 152%	3,7 19%	3,3 26%	3,2 13%

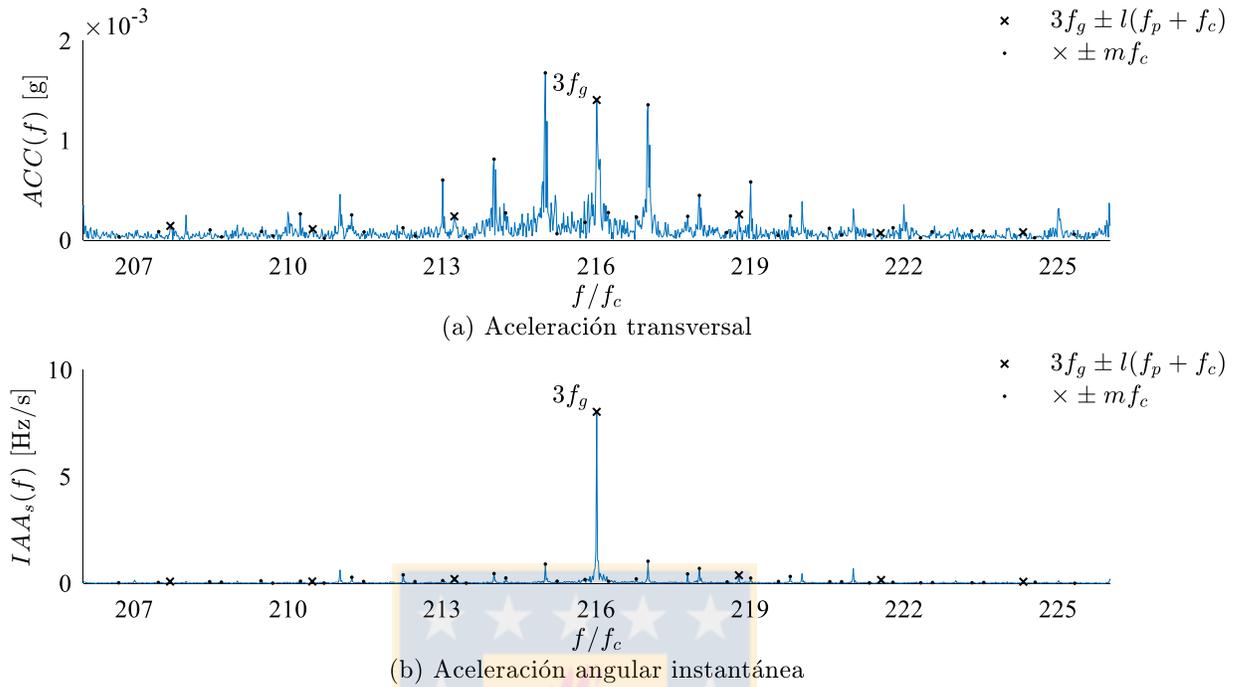


Figura 7.6. Espectro en *orders*, daño en un planeta, $f_s = 500$ CPM, $T_l = T_{l,B}(t)$.

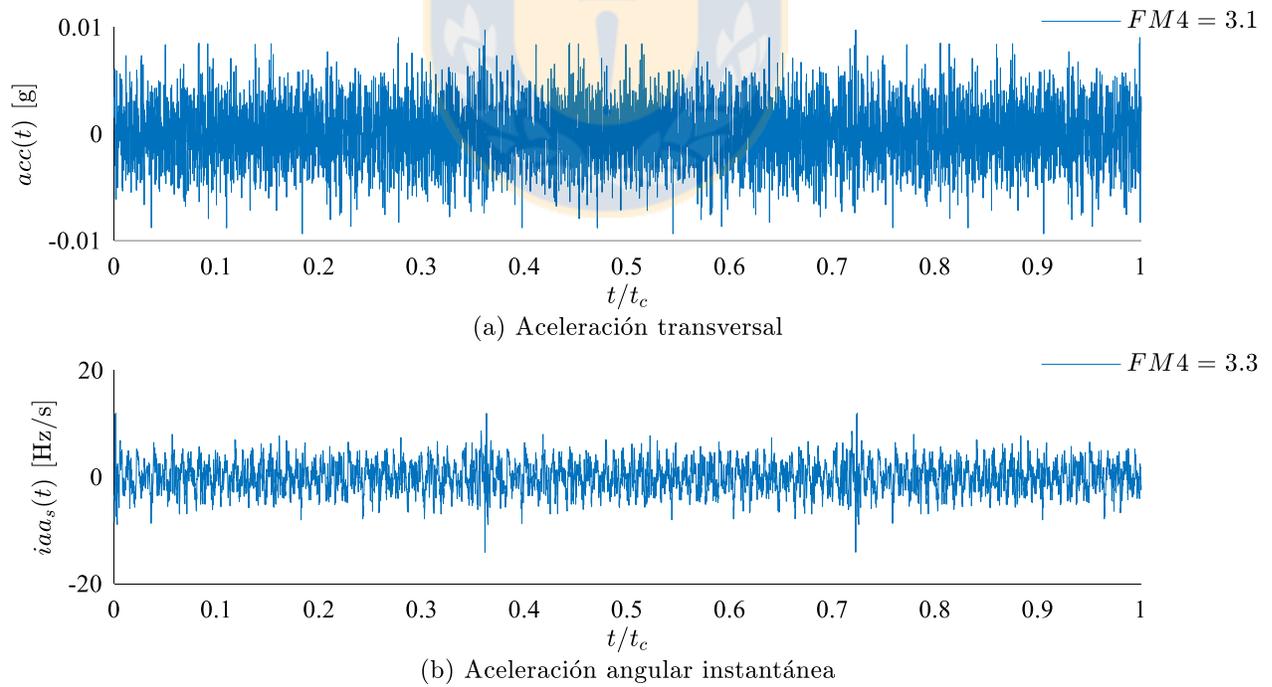


Figura 7.7. Señal diferencia, daño en un planeta, $f_s = 500$ CPM, $T_l = T_{l,B}(t)$.

7.4. Daño en el anillo

La Figura 7.8 muestra el espectro de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol para la condición de daño en el anillo, donde se observan las mismas componentes descritas para los ensayos bajo condiciones de operación constante. La Figura 7.9 presenta la señal diferencia de la aceleración transversal y de la aceleración angular instantánea del sol. Se observa que es posible distinguir la perturbación asociada al engrane del diente dañado para ambas señales.

La Tabla 7.3 muestra el $FM4$ para las diferentes condiciones de operación ensayadas. Se observa que la aceleración transversal no presenta evidencia del daño. Esto se debe a que la modulación producto del paso de planetas aumenta el *kurtosis* de la señal de referencia sin daño. Por otro lado, la aceleración angular instantánea presenta evidencia del daño en la totalidad de los casos ensayados. De forma similar al caso de la condición de daño en un planeta, la aceleración angular instantánea del sol presenta un $FM4$ elevado para las condiciones de operación de $f_s = 1000$ CPM, asociado a la resonancia del tercer y séptimo armónico de la frecuencia de engrane. El comportamiento descrito no se observa para la aceleración transversal.

De esta forma, se concluye que sólo es posible diagnosticar correctamente un daño incipiente en el anillo en una transmisión operando bajo condiciones de operación variable utilizando la aceleración angular instantánea. De forma análoga a la condición de daño en un planeta, se concluye que las zonas resonantes de la transmisión tienen mayor influencia en la aceleración angular instantánea del sol que en la aceleración transversal.

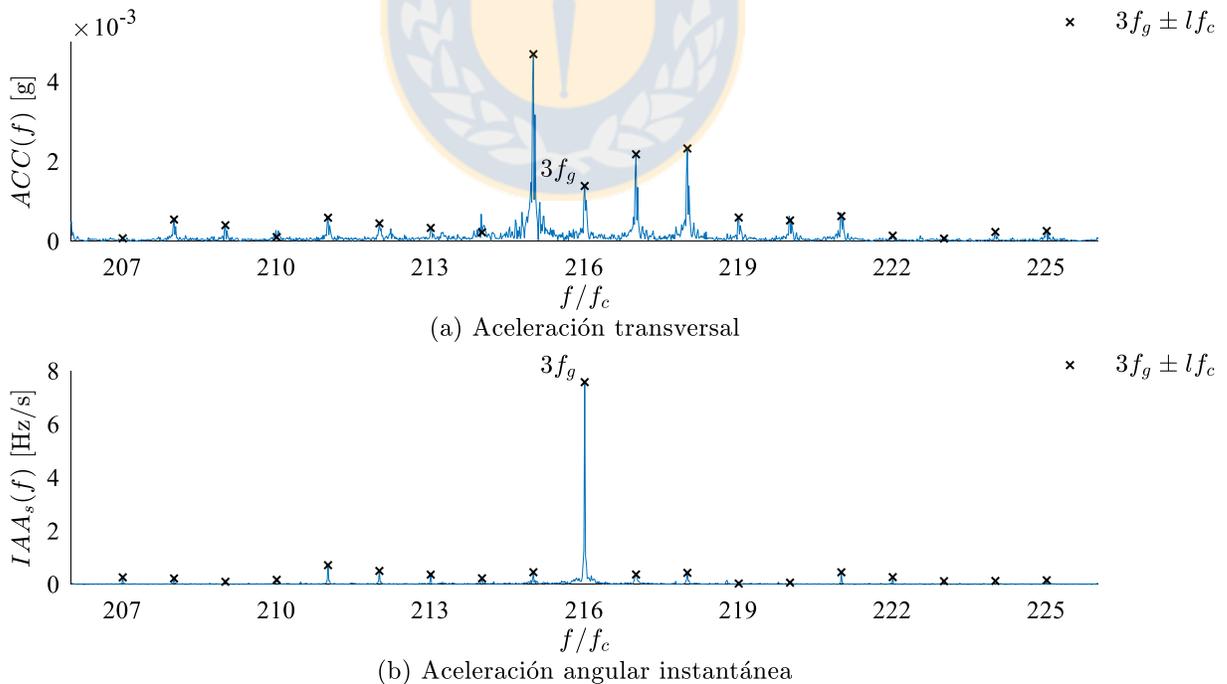


Figura 7.8. Espectro en *orders*, daño en el anillo, $f_s = 500$ CPM, $T_l = T_{l,B}(t)$.

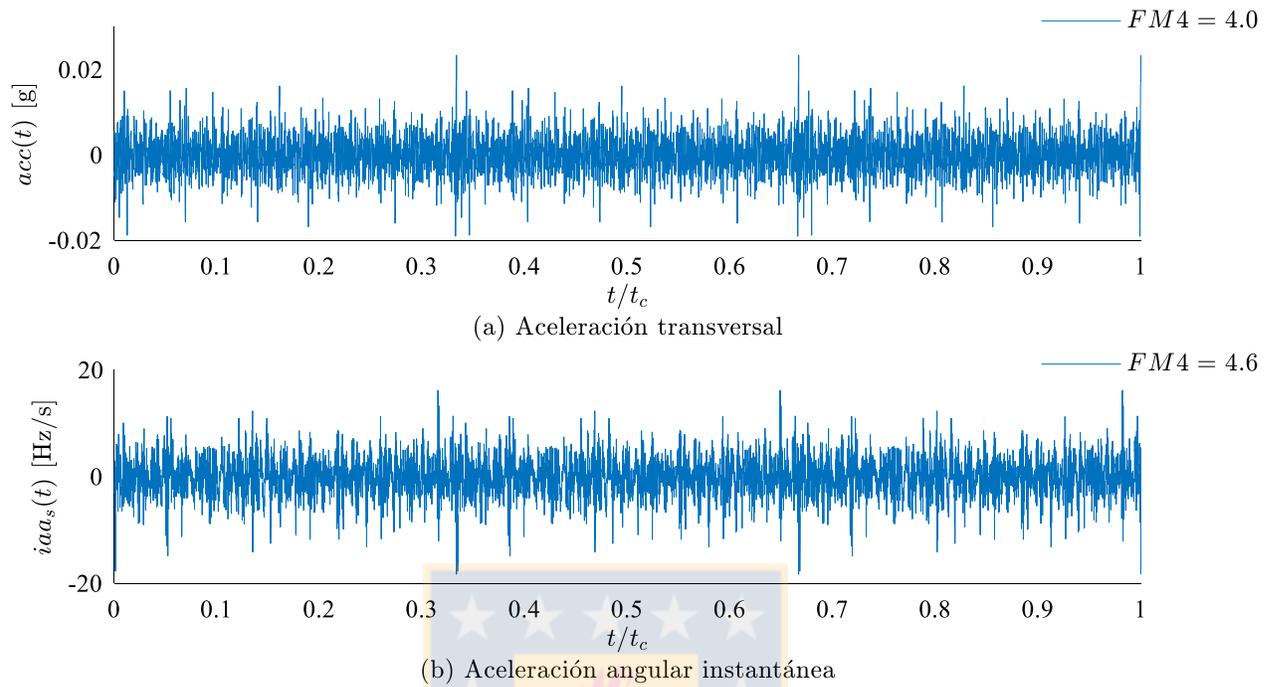


Figura 7.9. Señal diferencia, daño en el anillo, $f_s = 500$ CPM, $T_l = T_{l,B}(t)$.

Tabla 7.3. $FM4$, daño en el anillo.

	1500.A	1500.B	1500.C	1000.A	1000.B	1000.C	500.A	500.B	500.C
$acc(t)$	3,1	3,4	3,5	3,9	4,1	4,2	3,1	4,0	3,5
	-22%	-15%	-6%	-14%	-13%	-11%	-7%	-24%	-33%
$iaa_s(t)$	4,1	3,9	4,5	7,2	6,5	7,4	4,7	4,6	3,8
	42%	43%	58%	128%	106%	138%	32%	25%	16%

CAPÍTULO 8

Conclusiones y perspectivas

8.1. Conclusiones generales

En este trabajo se presenta la evaluación experimental del análisis de la aceleración transversal, velocidad angular y aceleración angular instantánea del sol como técnicas para el diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias. La evaluación se realiza considerando diferentes tipos de daño local bajo condiciones de operación de velocidad de rotación y carga tanto constante como variable.

A partir del análisis de las mediciones experimentales realizadas, se concluye que un daño local, ya sea en el sol, en un planeta o en el anillo produce variaciones en la aceleración transversal, en la velocidad y aceleración angular instantánea del sol. En la mayoría de los ensayos realizados, estas variaciones pueden ser identificadas a través del análisis espectral, del análisis de la señal diferencia o del análisis del indicador estadístico *FM4* de las señales estudiadas.

Para el caso de la velocidad y aceleración angular instantánea, se destaca su procesamiento de datos ya que no requiere remuestreo angular a partir de otro dispositivo de medición, como ocurre en el caso de la aceleración transversal. Se concluye que se obtiene mejor evidencia del daño utilizando el encoder lado planetario en comparación al encoder lado motor, ya que este último aísla el encoder óptico de las vibraciones torsionales producidas en el proceso de engrane. Además, se observa que el uso de la aceleración angular instantánea en vez de la velocidad angular instantánea realza la evidencia del daño al aumentar la amplitud de las componentes en alta frecuencia, que es donde se encuentran las diferentes zonas resonantes de la transmisión.

Para los casos de daño local en un planeta y daño local en el sol, se confirma que la velocidad y aceleración angular instantánea del sol presentan una menor cantidad de familias de bandas laterales que la aceleración transversal. Esto presenta una ventaja del análisis de la velocidad y aceleración angular instantánea en el diagnóstico de daños de tipo local. Para las condiciones de operación de velocidad de rotación y carga variable, se destaca la capacidad de detección de daño de la aceleración angular instantánea del sol por sobre la aceleración transversal. Se observa que a medida que aumentan las variaciones de velocidad en torno a la velocidad de rotación media, la capacidad de diagnóstico de fallas de la aceleración transversal disminuye, mientras que la aceleración angular instantánea no se ve afectada.

Se destaca además la efectividad del análisis de la señal diferencia como técnica de procesamiento de señales y el *FM4* como indicador de la condición mecánica para el diagnóstico de daños de tipo local, permitiendo encontrar en la mayoría de los casos perturbaciones a la frecuencia de falla con mayor facilidad que el análisis espectral

8.2. Perspectivas

Las conclusiones presentadas están basadas en mediciones experimentales para distintos tipos de daño local, bajo condiciones de operación de velocidad de rotación y carga tanto constante como variable. Para determinar de forma más real la efectividad de las técnicas de procesamiento de datos utilizadas se propone el estudio del progreso del daño y su influencia sobre diferentes indicadores de la condición mecánica, con el objetivo de definir criterios de alarma para estos mismos. Se propone además el estudio de otras condiciones de daño, ya sea daño distribuido en los engranajes o daño en los rodamientos.



REFERENCIAS

- Blunt, D. (2004). *Synchronous averaging of epicyclic sun gear vibration*. United States Patent
- Braun, S. (2011). The synchronous (time domain) average revisited. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 25, Issue 4, 1087-1102
- Combet, F. y Zimroz, R. (2009). A new method for the estimation of the instantaneous speed relative fluctuation in a vibration signal based on the short time scale transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 23, Issue 4, 1382-1397
- Cooley, C. G. y Parker, P. G. (2014). *A review of planetary and epicyclic gear dynamics and vibrations research*. Applied Mechanics Review, Volume 66, Issue 4
- Feng, Z. y Zuo, M. (2013). Fault diagnosis of planetary gearboxes via torsional vibration signal analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 36, Issue 2, 401-421
- Feng, Z., Chen, X. y Liang, M. (2016). Joint envelope and frequency order spectrum analysis based on iterative generalized demodulation for planetary gearbox fault diagnosis under nonstationary conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 76-77, 242-264
- Feng, Z., Lin, X. y Zuo M. (2016). Joint amplitude and frequency demodulation analysis based on intrinsic time-scale decomposition for planetary gearbox fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 72-73, 223-240
- Forrester, D. (1998). *Method for the separation of epicyclic planet gear vibration signatures*. United States Patent
- Jiang, X. y Li. S. (2016). A dual path optimization ridge estimation method for condition monitoring of planetary gearbox under varying speed. *Measurement*, Volume 94, 630-644
- Jiang, X., Li. S. y Wang, Q. (2016). A Study on Defect Identification of Planetary Gearbox under Large Speed Oscillation. *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2016

- Lebold, M., McClintic, K., Campbell, R., Byington, C., Maynard, K (2000). Review of Vibration Analysis Methods for Gearbox Diagnostics and Prognostics. Proceedings of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, 623-634
- McFadden, P. D. (1991). A technique for calculating the time domain averages of the vibration of the individual planet gears and the sun gear in an epicyclic gearbox. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 144, Issue 1, 163-172
- Molina, C. (2012). Theoretical frequency analysis of vibrations from planetary gearboxes. *Forsch Ingenieurwes*, Volume 76, Issue 1, 15-31
- Morales, I. (2016). *Evaluación de distintas técnicas para el diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias*. Proyecto de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción
- Morales, I. (2017). *Evaluación experimental de distintas técnicas para el diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias*. Memoria de título, Universidad de Concepción
- Ovaska, S.J. y Valiviita, S. (1998). Angular acceleration measurement: a review. *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1998. IMTC/98*. Conference Proceedings. IEEE
- Parra, J. (2015). *Caracterización de síntomas vibratorios producidos por fallas en transmisiones planetarias*. Memoria de Título, Universidad de Concepción
- Parra, J. (2017). Two methods for modeling vibrations of planetary gearboxes including faults: comparison and validation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 92, 213-225
- Pattabiraman, T.R., Srinivasan, K. y Malarmohan, K. (2015). Assessment of sideband energy ratio technique in detection of wind turbine gear defects. *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 2, 1-11
- Roy, S., Mohanty, A. y Kumar, C. (2015). Amplitude Demodulation of Instantaneous Angular Speed for Fault Detection in Multistage Gearbox. *Mechanisms and Machine Science*, Volume 23, 951-961
- Samuel, P. y Pines, D. (2000). Vibration separation methodology for planetary gear health monitoring. *Smart Structures and Materials 2000: Smart Structures and Integrated Systems*, 250

- Saavedra, P. N. y González, J. A. (2005). New revolution-order transform for analysing non-stationary vibrations. *OR Insight*, Volume 47, 29-35
- Sheng, S. (2012). *Wind Turbine Gearbox Condition Monitoring Round Robin Study – Vibration Analysis*. National Renewable Energy Laboratory
- Stander, C. y Heyns, P. (2005). Instantaneous angular speed monitoring of gearboxes under non-cyclic stationary load conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 19, 817-835
- Yu, S.D. y Zhang, X. (2010). A data processing method for determining instantaneous angular speed and acceleration of crankshaft in an aircraft engine–propeller system using a magnetic encoder. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 24, Issue 4, 1032-1048
- Zimroz, R. y Combet, F. (2006). Time varying outer load and speed estimation by vibration analysis - application to planetary gearbox diagnosis in a mining bucket wheel excavator. *Diagnostyka*, 4
- Zimroz, R., Urbanek, J., Barszcz, T., Bartelmus, W., Millioz, F. y Martin, N. (2011). Measurement of Instantaneous Shaft Speed by Advanced Vibration Signal Processing - Application to Wind Turbine Gearbox. *Metrology and Measurement Systems*, Volume 18, Issue 4, 701-712

